UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FFCLRP - DEPARTAMENTO DE FÍSICA E MATEMÁTICA
PROGRAMA DE FÍSICA APLICADA À MEDICINA E BIOLOGIA

Desenvolvimento de um leitor digital de absorbância microprocessado

Aldriano José da Silva

Dissertação apresentada à Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto da USP, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área: Física Aplicada à Medicina e Biologia

RIBEIRÃO PRETO - SP
2011

ALDRIANO JOSÉ DA SILVA

Desenvolvimento de um leitor digital de absorbância microprocessado

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Física Aplicada à Medicina e Biologia da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Orientador: Prof^a. Dra. Adelaide de Almeida

Este texto corresponde à Versão Corrigida

Ribeirão Preto - SP

2011.

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE DOCUMENTO, POR MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Silva, A. J.

Desenvolvimento de um leitor digital de absorbância microprocessado / Aldriano José da Silva; orientador Prof^ª. Dra. Adelaide de Almeida.

– Ribeirão Preto/SP, 2011.

37 f.: il. ; 30 cm.

Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Física Aplicada à Medicina e Biologia) – Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo, 2011.

1. Dosímetro Fricke Xilenol Gel. 2. Microcontrolador. 3. Instrumentação.

Nome: Silva, Aldriano José

Título: Desenvolvimento de um leitor digital de absorbância microprocessado

Dissertação apresentada à Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto da USP, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área: Física Aplicada à Medicina e Biologia

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____ Instituição: _____
Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____ Instituição: _____
Julgamento: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____ Instituição: _____
Julgamento: _____ Assinatura: _____

Dedicatória

Dedico este trabalho a DEUS, por tantas bênçãos maravilhosas e pela Vossa presença em todos os momentos da minha vida. Também aos meus pais, José da Silva e Cecília de Sá Silva, e à minha esposa Vânia Pinatti e minhas filhas Amanda e Lívia, pelo apoio, amor e carinho em todos os momentos desta caminhada. Paz Inverencial!

Agradecimentos Especiais

À Professora Dra. Adelaide de Almeida,

Pela confiança depositada em mim e pelo apoio nos meus momentos de dificuldades nas disciplinas durante o curso. Que nosso senhor Jesus continue abençoando e dando saúde, juntamente com seu esposo Professor Zimmerman. Peço à ela que nunca pare de dar oportunidades a quem lhe pedir. Nestes três anos, descobri o quanto é profissional, honesta e carismática com as pessoas, prossiga assim.

Muito obrigado!

Agradecimentos

Quero neste espaço agradecer a algumas pessoas que, de alguma maneira, participaram da elaboração desta dissertação de Mestrado. Necessariamente não obedecerei a uma ordem cronológica. Antecipadamente peço desculpa por ter esquecido alguém.

Ao Grupo Radiare em peso: Lucas Nonato de Oliveira, pela primeira estadia na casa 13 quando cheguei à USP, ao amigo Francisco G. A. Sampaio, pelas primeiras aulas de física médica e continua ajuda, Luiz Fernando Pirani, pela hospedagem e bate papo no CREU, ao Lucas Del Lama, professor das dúvidas de aula de FAMB e continua ajuda, David Marçal pelos diversos assuntos desde física a Ubuntu (Linux), Fernanda Cavalcante, Michely Cristina da Silveira, Caroline Czelusniak, Paulo C. D. Petchevist, pelas irradiações, Rosangela T. Costa, Adriano Bianchini, Marcos V. Moreira, Rodrigo Sato, enfim, ratificando, a todos pela amizade e colaboração, por toda presteza e amizade durante este três anos.

Ao ex-comandante do Segundo Batalhão de Polícia Ambiental do Estado de São Paulo, Ten Cel PM Milton Paulo Boer e ao atual comandante Ten Cel PM Wellington Carlos da Cunha. Acredito que acima das patentes existe um respeito à obra do criador, o homem. Grato pelo apoio.

Aos técnicos do DF - FFCLRP, Elcio Aparecido Navas, que até em seus momentos de folga contribuiu com seu rico conhecimento em eletrônica, a José Luiz Aziane, “chato”, mas meu amigo, pela confecção da nova caixa no protótipo e bate-papos, ao Sergio Bueno pela amizade. A todos obrigado por sempre atender nosso Grupo.

Ao Prof. Dr. Marcelo Mulato, coordenador da FAMB, pela confiança a mim depositado e incentivo.

Ao Prof. Dr. Alexandre Souto Martinez, pela amizade.

Ao Prof. Dr. Iouri Borissevitch, pelas explicações das dúvidas sobre irradiação e pela amizade.

Ao Prof. Dr. Aparecido Augusto de Carvalho, pelo apoio e confiança a mim depositado quando passei pela UNESP. Quanta honra em conhecê-lo.

Aos professores da Pós-Graduação que nunca pouparam esforços para transmitir seus conhecimentos.

Aos funcionários da pós-graduação e da secretaria do departamento de Física Médica/Matemática.

Aos meus amigos Francisco Sérgio dos Santos (o Cocão) e Carlos Eduardo Custódio, responsáveis por me motivar e apoiar na área de programação, em 1989. Já algum tempinho, heim?

Aos meus irmãos biológicos, necessariamente nesta ordem: Antonio, Eliana, Silvana, Alcides, Suzana e André, desculpem por ser tão exigente na ausência de nosso pai. Obrigado “Toim” pela força!

Aos meus irmãos que trabalham na mesma estrada.

À USP, pela infra-estrutura fornecida.

“... é morrendo que se vive para a vida eterna.”

São Francisco de Assis

Resumo

SILVA, A. J. **Desenvolvimento de um leitor digital de absorbância microprocessado.** Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto - SP, 2011.

O espectrofotômetro, aparelho muito utilizado para realizar leituras de absorbância e/ou transmitância de amostras laboratoriais, pode ser aplicado para a realização de leituras do dosímetro químico Fricke Xilenol Gel. Este aparelho, por possuir componentes eletrônicos avançados e ser importado, apresenta um custo elevado e acaba muitas vezes se tornando um dispositivo inviável para medidas mais simples e rotineiras. O presente estudo implementou-se um aparelho portátil e de baixo custo, para que medidas específicas de absorbância possam ser feitas em laboratórios de ensino de física e que possa ser aplicado como leitor de dosímetros géis, como o acima citado. Este “monoespectrofotômetro” é constituído por uma fonte LED (próximo a 590 nm), um fotodiodo para avaliação da intensidade da luz transmitida e um display de LCD. Tal leitor permite a comunicação com microcomputadores via porta USB, facilitando o trabalho do usuário para manipular os resultados das medidas. A principal finalidade é voltada para uso acadêmico, no entanto, devido ao seu baixo custo e simplicidade, poderá também ser direcionado para atender outros segmentos como ambulatorial, industrial, cosmético, biológico, agrônômico, dentre outros.

Palavras-chave: 1. Dosímetro Fricke Xilenol Gel. 2. Microcontrolador. 3. Instrumentação.

Abstract

SILVA, A. J. **Development of a digital reader Absorbance microprocessor** . Dissertation (Master) – Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto - SP, 2011.

The spectrophotometer, a device often used to perform absorbance readings and or transmittance of laboratory samples, can be applied to perform readings in the chemical dosimeter Fricke Xylenol Gel. This device, once it has advanced electronics components and is imported, has an elevated cost and often ends up becoming an impractical device for most simple measurements and routine. This study implemented a device portable and inexpensive, so that specific measurements absorbance can be made in teaching laboratories of physics and that can be applied as a gel dosimeter reader, like the above. This “monospectrophotometer” consists of a LED source of visible light (near 590 nm), a photodiode to assess the intensity of transmitted light and an LCD display. This reader allows communication with computers via USB port, making it easier for users to manipulate the results of the measurements. The main purpose is directed for academic use, however, due to its low cost and simplicity, may also be applied to attend other segments such as outpatient, industrial, cosmetic, biological, agronomic, among others.

Keywords: 1. Dosimeter Fricke Xylenol Gel. 2. Microcontroller. 3. Instrumentation.

Sumário

Agradecimentos	vii
Resumo	x
Abstract	xi
Lista de Figuras	xiv
Lista de Siglas	xvi
1 Introdução	1
2 Objetivos	3
3 Aspectos Teóricos	4
3.1 Interação da radiação luminosa com a matéria	4
3.2 Dosímetro Fricke	5
3.3 Diodos emissores de luz	6
3.4 Diodos receptores de luz	7
3.5 Microprocessadores	7
3.6 Microcontrolador	9
3.7 Regulador de tensão	9
3.8 Comunicação serial	11
3.8.1 Padrão RS232	11
3.8.2 Padrão USB	12

3.9	Amplificador operacional	12
4	Materiais e Métodos	15
4.1	Materiais	15
4.1.1	Materiais utilizados na preparação do Dosímetro Fricke Xilenol Gel . .	15
4.1.2	Cubetas para acondicionamento do dosímetro químico FXG	15
4.1.3	Fonte de radiação	16
4.1.4	Fonte de luz utilizada	16
4.1.5	Sensor de luz	16
4.1.6	Microcontrolador	17
4.1.7	Módulo LCD - <i>Liquid Crystal Display</i>	18
4.1.8	Comunicação RS 232	19
4.1.9	Ferramenta de Desenvolvimento	19
4.1.10	Equipamento utilizado para testes de estabilidade do novo Leitor	22
4.2	Métodos	23
4.2.1	Montagem do Radiare IV	23
4.2.2	Irradiação do Dosímetro	26
4.2.3	Curvas de calibração	26
4.2.4	Medidas com o sistema desenvolvido	27
4.2.5	Fluxograma da operacionalidade do RADIARE IV	27
5	Resultados e Discussões	30
5.1	Radiare IV	30
5.2	Código Fonte	31
5.3	Reprodutibilidade do Radiare IV	32
5.4	Curvas de calibração	32
6	Conclusões	34

Lista de Figuras

1.1	(a) Radiare (b) Radiare 2 e (c) Radiare 3.	2
3.1	Fotodiodo e seu circuito para converte corrente para tensão.	8
3.2	Esquema mostrando o diodo receptor e o emissor de luz.	8
3.3	Conexão do CI regulador de tensão fixa.	9
3.4	Pinagem do CI regulador de tensão fixa.	10
3.5	Pinagem do regulador de tensão ajustável LM317T.	10
3.6	Conexão do regulador de tensão ajustável LM317T.	11
3.7	Pinos do conector DB9 do microcomputador	11
3.8	Diagrama da comunicação do Max232 com os periféricos.	11
3.9	Níveis de conversão do Max232.	12
3.10	Pinagem do conector USB.	13
3.11	Símbolo elétrico de um amplificador operacional.	13
4.1	Cubeta padrão de $4,50 \times 1,00 \times 1,00 \text{ cm}^3$	16
4.2	Fonte (^{60}Co) Theratronics/Theratron.	16
4.3	Espectro de emissão do LED âmbar em (590 nm) e largura à meia altura de 14 nm.	17
4.4	(a) Exemplo de um fotodiodo, (b) Símbolo do fotodiodo em um circuito elétrico e (c) Curva característica do fotodiodo com e sem luz incidente.	17
4.5	(a) Encapsulamento DIP e (b) Pinagem do microcontrolador Atmega8.	18
4.6	Módulo LCD 16×2 para mostrar os resultados das leituras.	19
4.7	Referência da Pinagem do Módulo e circuito do LCD 16×2	19
4.8	Configuração de pinos e circuito típico.	20

4.9	Ligação básica entre Atmega8 e o CI MAX232.	20
4.10	BASCOM-AVR®, utilizado para o desenvolvimento do código fonte para micro controlado.	21
4.11	Tela do software BASCOM-AVR®, para simulação do código fonte.	21
4.12	Programa PonyProg, para gravação do código .hex no microcontrolador.	22
4.13	Circuito programador GP AVR para gravação no microcontrolador.	22
4.14	Ferramenta do programa P-CAD 2004 utilizada para projeto de placas para os circuitos eletrônicos.	23
4.15	(a) Radiare III e (b) Radiare IV.	23
4.16	Diagrama da montagem para obtenção das medidas.	24
4.17	Módulo leitor digital (teste) e o display LCD do protótipo IV.	24
4.18	Layout da placa gerada pela ferramenta P-CAD 2004.	25
4.19	Área de medição e adaptador que acomoda a fonte emissora de luz, nos protótipos III e IV.	27
4.20	Fluxograma de operacionalidade do protótipo proposto, Radiare IV. Legenda: Botão 1 – Armazenar ponto(s); Botão 2 – Visualizar ponto(s); Botão 3 – Reiniciar processo; Botão 4 – Enviar ponto(s) para a porta de comunicação. . .	29
5.1	(a) Placa principal do Radiare IV e (b) Placa com o display e botões com funções para armazenar o sinal, mostrar o valor em absorbância, reiniciar e enviar para a porta serial.	30
5.2	Protótipo Radiare IV, no qual foram implementados os códigos-fontes tanto para aquisição das leituras das amostras, como também aquele para o cálculo da equação de Lambert-Beer.	31
5.3	(a) Parte do código-fonte para aquisição de leituras das amostras. e (b) Parte do código-fonte para cálculo da equação de Lambert-Beer.	31
5.4	Gráfico da tensão em função da densidade óptica para averiguação da reprodutibilidade do Radiare IV e do multímetro Tektronix DMM914.	32
5.5	Absorbâncias do FXG em função da dose absorvida em 590 nm para os protótipos Radiare III e IV.	33

Lista de Siglas

AX Alaranjado de Xilenol

FXG Fricke Xilenol Gel

BASCOM Compilador Basic (*Basic Compiler*)

FAMB Física Aplicada a Medicina e a Biologia

CREU Conjunto Residencial dos Estudantes Universitários

CI Circuito Integrado

LED Diodo emissor de luz (*Light Emitting Diode*)

AVR Linha de microcontroladores empresa Norte Americana ATMEL

CMOS *Complementary Metal Oxide Semiconductor*. Um pequeno pedaço de memória volátil, alimentado por uma bateria, usado para gravar informações

RISC *Reduced Instruction Set Computer*. Computadores que possuem um conjunto reduzido instruções, sendo em compensação extremamente rápidos

PIPELINE Técnica que consiste em dividir o processador em vários estágios (níveis) distintos para execuções das instruções

HARVARD Arquitetura interna do microcontrolador, ou seja, apresenta um barramento para dados e outro para programa

USB *Universal Serial Bus*, tipo de conexão “ligar e usar” que permite a conexão de periféricos sem a necessidade de desligar o computador

ASSEMBLY Linguagem de programação de baixo nível

PROTOBOARD Placas para protótipos, usadas para montagens de circuitos temporários, sem o uso de soldas

A/D Conversor analógico digital. Circuito que transforma um valor analógico numa sequência de códigos binários

LCD *Liquid Crystal Display*, ou Tela de Cristal Líquido

LAYOUT Esboço que mostra como texto, a distribuição espacial e dimensão de elementos, gráficos ou figuras

NOTCH Filtros capazes de rejeitar uma faixa bastante estreita de frequências. Sua utilização é recomendada quando o sinal a ser atenuado é bem definido

1 Introdução

O espectrofotômetro é um instrumento amplamente utilizado em laboratórios, cuja função é a de medir a radiação absorvida ou transmitida por um material. Este aparelho possui uma gama de aplicações e está presente em várias áreas, tais como em química, física, bioquímica e biologia molecular. O grande inventor deste instrumento tão fundamental foi o químico americano Arnold O. Beckman, em 1940.

Em geral, um espectrofotômetro possui uma fonte estável de energia radiante, um recipiente para colocar a amostra a ser analisada e um detector de radiação, que permite uma medida relativa da intensidade da luz. A base da espectrofotometria, portanto, é passar um feixe de luz através da amostra e fazer a medição da intensidade da luz que atinge o detector, comparando quantitativamente a fração de luz que passa através de uma amostra de referência com a da amostra que está sendo avaliada, aplicando a lei básica Lambert e Beer para obtenção da absorbância (JOHNS; CUNNINGHAM, 1983).

O controle da dose absorvida é imprescindível para garantir a qualidade de um tratamento radioterápico. Para medidas de doses, neste trabalho, foi utilizado o dosímetro químico Fricke Xilenol Gel (FXG), que vem sendo investigado pelo Grupo Radiare DF/FFCLRP/USP, demonstrando características adequadas para a utilização como ampla faixa de linearidade de resposta com a dose e energia das radiações ionizantes. O dosímetro químico Fricke foi desenvolvido por Hugo Fricke e Sterne Morse em 1927; era uma solução resultante de três reagentes, o sulfato ferroso de amônio, o ácido sulfúrico e água (TOBIAS; HART; PLATZMAN, 1962). Ao longo do tempo vem sendo aprimorado de forma a minimizar sua oxidação espontânea em tempo e temperatura (estabilidade), melhorar seus limites de detecção de intervalo de dose e aumentar sua sensibilidade à dose de radiação (COSTA, 2001).

O espectrofotômetro é um instrumento encontrado comercialmente e possui uma ampla faixa espectral. Porém, seu custo é elevado. Com o avanço da tecnologia e disponibilização de componentes eletrônicos, como os LEDs (Diodo Emissor de Luz) (DASGUPTA et al., 1993), fotodiodos e microcontroladores, no mercado, têm proporcionado muitas vantagens no setor de

Figura 1.1: (a) Radiare (b) Radiare 2 e (c) Radiare 3.

instrumentação óptica (DASGUPTA et al., 1993, 2003), especialmente para desenvolvimento de equipamentos fotômetros de fácil portabilidade, praticidade e baixo custo. O LED é um diodo semiconductor que foi inventado pelo físico inglês John Ambrose Fleming, no ano de 1904. Devido à sua estabilidade e confiabilidade, atualmente são aplicados em diversos sistemas analíticos (DASGUPTA et al., 1993, 2003; GAIÃO et al., 2005; PASQUINI; JR.; M., 1984; ARAÚJO et al., 1997; PEREIRA; CARDOSO; DASGUPTA, 2001; ROCHA; MARTELLI; REIS, 2004).

A motivação deste trabalho veio da necessidade de um equipamento portátil, de baixo custo para leituras digitais de absorbâncias no laboratório Radiare. A série dos protótipos Radiare, para medidas num único comprimento de onda começou com o Radiare I (Figura 1.1a), era um aparelho de bancada, com cubeta tamanho padrão e as leituras eram feitas somente em um ponto da amostra. O Radiare II (Figura 1.1b) apresentou portabilidade, contudo a leitura continuou a ser realizada da mesma forma que o aparelho de bancada, ou seja, com cubeta tamanho padrão e leitura em somente um ponto da amostra. Por sua vez o Radiare III (Figura 1.1c), manteve as características do Radiare II, com a melhoria de que as leituras podiam ser feitas em diferentes pontos e tamanhos de cubetas.

O presente trabalho consiste primordialmente em desenvolver um leitor digital de absorbância microprocessado, em substituição ao nosso protótipo Radiare III que utiliza um multímetro para obtenção das medidas de absorbância. Para tal automatização foram utilizados componentes de baixo custo e disponíveis comercialmente.

No **CAPÍTULO 2** são apresentados os objetivos para o desenvolvimento deste trabalho. No **CAPÍTULO 3** são apresentados os aspectos teóricos pertinentes a este trabalho. No **CAPÍTULO 4** são apresentados os materiais, métodos e a operacionalidade do leitor digital proposto. No **CAPÍTULO 5** são apresentados os resultados das medidas realizadas para fins de calibração e validação do novo leitor e no **CAPÍTULO 6** são apresentadas as conclusões.

2 *Objetivos*

Os objetivos deste trabalho foram:

Desenvolver um leitor microprocessado para leituras digitais de absorvência (Radiare IV), em substituição ao protótipo Radiare III que utiliza um multímetro para obtenção das medidas de absorvência,

Implementar ao equipamento fácil portabilidade, praticidade e baixo custo,

Comparar o desempenho do equipamento com outros espectrofotômetros comerciais,

Simplificar a obtenção das medidas, através de um leitor integrado que processa os cálculos das absorvências e apresenta os valores em um mostrador LCD,

Permitir a comunicação do protótipo com microcomputadores, para a manipulação dos dados, através de uma interface de comunicação (serial e porta USB).

3 *Aspectos Teóricos*

3.1 **Interação da radiação luminosa com a matéria**

A radiação luminosa ao atingir uma matéria pode ser refletida, refratada, espalhada ou ainda absorvida pelo material, desta maneira, há possibilidade de uma parte da radiação incidente ser transmitida. O processo de absorção ocorre a nível molecular e assim como acontece num átomo, cada molécula caracteriza-se por possuir níveis de energia quantizados, os quais podem ser ocupados por elétrons. Por outro lado, a radiação carrega energia, sendo que o valor desta depende do seu comprimento de onda. A absorção da radiação se dá quando sua energia é igual à diferença de energia entre dois níveis de energia da molécula. Nessa situação, a energia da radiação é transferida para a molécula e ocorre a chamada absorção da radiação (DYER, 1965; SILVA; OLIVEIRA, 2001).

Moléculas de substâncias diferentes têm diferentes níveis moleculares de energia, portanto cada substância absorve a radiação de maneira peculiar. Assim, os comprimentos de onda que certa substância absorverá são característicos da sua estrutura e outras substâncias absorverão em outros comprimentos de onda. Se levantarmos dados referentes à intensidade de luz absorvida, por uma substância, em função do comprimento de onda da radiação, poderemos obter o espectro de absorção desta substância. Sendo que cada substância tem o seu espectro característico, a identificação de uma substância ou material desconhecido pode ser feita a partir da sua curva de absorção, comparada com as curvas das substâncias conhecidas. Uma vez conhecido o espectro de absorção de uma dada substância, pode-se também determinar a quantidade ou concentração desta substância na solução analisada. Isto é feito através das medidas das intensidades da luz que incidiu e atravessou a amostra.

O espectrofotômetro é um instrumento que permite a obtenção de espectros de absorbância (equação 3.1) ou transmitância (equação 3.2) através de uma amostra, utilizando a razão entre

as intensidades de luz com e sem a amostra.

$$A = \log \left(\frac{I_0}{I} \right), \quad (3.1)$$

$$T = \frac{I}{I_0}. \quad (3.2)$$

Essas funções também podem estar correlacionadas ao tipo de substância que está sendo analisada, através do coeficiente de absorvidade ou absorção (ϵ) que é dependente do comprimento de onda da radiação, da espessura da amostra (l) e da concentração do soluto (c) de interesse nas medidas, conforme equação 3.3. A expressão que envolve todas essas considerações é conhecida por lei de Lambert-Beer. Lambert estudou a transmissão de luz por sólidos homogêneos e Beer, estendeu o trabalho do primeiro para o estudo de soluções. Para esta lei a radiação incidente deve ser monocromática e são considerados desprezíveis os efeitos de reflexão, refração e espalhamento.

$$A = \log \left(\frac{I_0}{I} \right) = \epsilon \cdot l \cdot c. \quad (3.3)$$

Desta maneira, a absorbância é proporcional à concentração e então o espectrofotômetro pode se tornar um medidor da concentração, seletivo para uma determinada substância, através da relação (DYER, 1965; SILVA; OLIVEIRA, 2001; FELIPE, 2003; COSTA, 2001):

$$c = \frac{A}{\epsilon \cdot l}. \quad (3.4)$$

3.2 Dosímetro Fricke

O dosímetro é capaz de fornecer uma leitura da energia da radiação absorvida por massa de um meio de interesse ou uma leitura em dose absorvida. Existem alguns tipos de dosímetros que normalmente são utilizados para medidas da distribuição de dose da radiação como câmaras de ionização, filmes, termoluminescentes, Fricke, etc. Neste trabalho o dosímetro químico Fricke será utilizado para validação do protótipo de leitura.

A dosimetria química consiste na determinação da dose absorvida a partir das medidas das variações nas concentrações dos reagentes químicos de uma solução, induzidas pela radiação ionizante. Da interação da radiação ionizante com o meio podem surgir íons que podem favorecer reações com outras moléculas e produzir radicais livres e íons secundários resultando em produtos químicos estáveis (PALM; MATTSON, 2000; GAY; COLLINS; GEBICKI, 1999). Hugo Fricke e Stern Morse em 1927 (FRICKE; MORSE, 1927), iniciaram um estudo sobre a

mudança química em solução contendo sulfato ferroso para a realização de medidas de dose absorvida quando irradiada por raios X. Posteriormente, diversos tipos de solução apareceram e em 2000 a original foi modificada com a adição de um corante e uma gelatina de origem animal que a tornou mais consistente, mais sensível e estável. A Fricke Xilenol Gel (FXG) ou Fricke modificado (BERO; GILBOY P. M. GLOVER, 2000).

O dosímetro químico Fricke baseia-se na oxidação de sulfato ferroso, que quando exposto à radiação, os íons ferrosos Fe^{+2} são oxidados para íons férricos Fe^{+3} , sendo a concentração desses últimos, proporcional à energia absorvida ou à dose absorvida (JOHNS; CUNNINGHAM, 1983). Utilizando a lei de Lambert-Beer (equação 3.3) é possível correlacionar a absorção, num determinado comprimento de onda, à concentração dos íons férricos formados.

A dose absorvida para este dosímetro pode ser escrita pela equação (COSTA, 2001; ATTIX, 2004; KHAN, 2003):

$$D = 9,647 \cdot 10^8 \left(\frac{\Delta A}{G(Fe^{+3}) \cdot \rho \cdot \Delta \epsilon \cdot l} \right) \quad (cGy) \quad (3.5)$$

Sendo:

ΔA = diferença das absorbâncias pré e pós irradiação,

l = caminho óptico,

ρ = densidade do gel,

$\Delta \epsilon$ = diferença do coeficiente de absorção molar entre os íons férricos e os íons ferrosos e

$G(Fe^{+3})$ = rendimento químico (números de íons férricos formados).

3.3 Diodos emissores de luz

Há praticamente dois tipos de fontes luminosas de diodo: o diodo emissor de luz LED (*Light Emitting Diodes*) (DASGUPTA et al., 1993) e o diodo laser. O LED, diodo de interesse para o trabalho, tem a vantagem de ser mais simples, barato, apresenta baixo consumo de energia e tempo de vida longa. Os LEDs podem ser encontrados em diversos modelos que emitem cores como o azul, verde, vermelho, âmbar, laranja, amarela, além de outras. Esta variedade de cor permite que estes dispositivos sejam capazes de emitir fótons com comprimentos de onda de 365 nm (ultravioleta) a 940 nm (infravermelho), apresentando a grande vantagem de realizar esta emissão de forma monocromática. A cor da luz emitida pelo LED irá depender do material e principalmente da dopagem de impurezas aplicadas. No desenvolvimento de LEDs

são essenciais dois tipos de materiais semicondutores (normalmente silício e germânio), um carregado positivamente e outro carregado negativamente (junções P-N).

A cor do LED é dependente da frequência da luz emitida e da substância que é utilizada em sua composição. Por exemplo, para a fabricação de LEDs vermelhos é utilizado o nitrato de gálio (GaN), para a obtenção de LEDs azuis é utilizado fosfato de gálio (GaP).

3.4 Diodos receptores de luz

A função dos fotodetectores é absorver a luz e convertê-la em corrente elétrica para processamento no receptor. O ideal é que os fotodetectores tenham o maior alcance possível, operando nos menores níveis possíveis de potência óptica, e convertendo esta potência em eletricidade com o mínimo de erros e de ruído.

Os tipos de fotodiodos usados para recepção de luz são o fotodiodo P-N (SHUR, 1990; DASGUPTA et al., 1993; MIYAZAKI; ITAMI; ARAKI, 1998) e o fotodiodo de avalanche (*Avalanche photodiode*). O primeiro é um fotodiodo comum que tem entre suas regiões P e N, uma região não dopada, chamada de região intrínseca, cujo objetivo é manter o campo elétrico na região constante. O segundo, por sua vez, é semelhante ao P-N, mas gera campos elétricos mais fortes o que o torna mais sensível que o P-N e, ao mesmo tempo, aumenta o ruído captado.

A eficiência de um receptor mede-se verificando a razão entre o sinal e o ruído. Isto ocorre porque a potência óptica que é recebida pode ser de ordem de *nanowatt*, o que torna necessária a amplificação do sinal. Assim, a eficiência de um fotodetector depende da sua capacidade de amplificar o sinal, sem gerar ruído novo nem amplificar os que vêm misturados com o sinal. Os receptores luminosos estão sujeitos a diversos fatores de contaminação, dentre os quais a potência óptica de polarização, que pode ser tratada como uma radiação de fundo, e a corrente escura, que é a corrente gerada pela excitação térmica do receptor, sem que ele esteja recebendo luz, entre outros.

Na Figura 3.1 encontra-se o diodo receptor de luz e na Figura 3.2 tem-se o diodo emissor e o receptor trabalhando em conjunto.

3.5 Microprocessadores

O primeiro microprocessador de uso geral foi desenvolvido pela Intel por volta de 1970. Era o 4004, um processador de 4 bits, utilizado em calculadoras. Rodava a 740 kHz, 8 ciclos

Figura 3.1: Fotodiodo e seu circuito para converter corrente para tensão.

Figura 3.2: Esquema mostrando o diodo receptor e o emissor de luz.

por instrução, utilizava 46 instruções, 1 K de RAM, 4 K de ROM, 1 acumulador pilha interno de sub-rotinas com 4 níveis, possuía 2300 transistores e encapsulamento DIP 16 pinos. No ano seguinte foi lançado o 4040 (ZILLER, 2000; CRISP, 2004; KLEITZ, 1997). Em 1974 foi anunciado a segunda geração do microprocessador, chamado de 8008, e logo depois o 8080. Os dois operavam com fonte de 5 V, trabalhavam com 8 bits e usavam tecnologia NMOS. Nessa mesma época a Motorola lançou seu primeiro microprocessador, o 6800, com o mesmo poder de processamento que o 8080. A arquitetura do Intel 8080 e Motorola 6800 são muito diferentes. O 8080 usa uma arquitetura baseada em registradores AX, BX, CX, DX e HL, todos de 16 bits, mas que podem ser usados como pares de 8 bits. Por exemplo: o AX pode ser usado como AH, parte alta de AX, e AL, parte baixa de AX. O acesso à memória era feito com instruções MOV, enquanto o acesso aos I/Os utilizava instruções IN e OUT. Já o 6800 utilizava uma técnica chamada “Memória Mapeada como I/O”, deixando os I/Os no mesmo espaço de memória. As instruções para acesso à memória e I/Os eram as mesmas. Possuía dois acumuladores A e B, e um registrador X de 16 bits. Os próximos microprocessadores lançados foram o 8085 (8 bits), 8086 (terceira geração, 16 bits), 8088 (16 bits), 80186 (16 bits), 80286 (16 bits), 80386 (32 bits) e segue até os da atualidade. O 8086 foi muito utilizado nos IBM PC, possuía *bus* de 8 bits, facilitando a comunicação com periféricos. A Motorola lançou depois do 6800 o 6809, o 68000 (16 bits), 68010 (16 bits), 68020 (16 bits), 68030 (16 bits). O 68000 foi utilizado nos PCs da

Apple.

3.6 Microcontrolador

Microcontrolador é um microprocessador com vários periféricos integrados num único chip (ZILLER, 2000; CRISP, 2004; KLEITZ, 1997), como por exemplo RAM, ROM, Timers, Contadores, Usart, etc. O primeiro foi lançado pela Texas em 1974, o TMS 1000 de 4 bits, que inclui RAM, ROM e suporte a I/O em um único chip, permitindo o uso sem qualquer outro chip externo. Em 1977, a Intel lançou o microcontrolador 8048, que possuía memória de programa externa (ROM), e memória de dados interna (RAM). A partir de 1980 surge a família 8051, com vários periféricos, 4 K de memória de programa e 128 bytes de memória de dados, possibilitando o uso sem a necessidade de chips externos. Este apresenta encapsulamento de 40 pinos e tecnologia HMOS. Atualmente, os fabricantes desenvolvem microcontroladores baseados no 8051 e adicionam vários outros periféricos como Comparadores, Conversores AD, PWM, utilizam memórias EEPROM e FLASH.

3.7 Regulador de tensão

Um regulador de tensão (CIPELLI; SANDRINI, 1984; BOYLESTAD; NASHELSKY, 1999; MALVINO, 1987; SEDRA; SMITH, 2000; CLOSE, 1967) é um dispositivo, geralmente formado por semicondutores, que tem por finalidade a manutenção da tensão de saída de um circuito elétrico. Sua função principal é manter a tensão produzida pela fonte de alimentação dentro dos limites exigidos pelo circuito elétrico que está alimentando. Normalmente, a tensão em um circuito varia de acordo com o consumo de alguns componentes, como indicadores de luz (LED). O regulador detecta esta queda e aumenta a sua tensão de saída para compensar. Ou o inverso, quando se desligam as luzes, o que reduz o consumo, fazendo a tensão aumentar. Existem vários tipos de reguladores de tensão.

Quanto à aplicação existem dois tipos: regulador com saída fixa e regulador com saída ajustável, ambos com tensões positivas e tensões negativas (Figura 3.3).

Os reguladores com tensão fixa são mais baratos e apresentam uma aplicação maior. A série 78xx e 79xx são os mais comuns destes tipos onde as letras “xx” indicam a tensão fixa da saída.

Alguns cuidados devem ser tomados ao utilizar os CI's: a tensão de entrada deve pelo menos ser 3 V mais alta do que a tensão de saída. Se a tensão for 5 V, a tensão de entrada deve

Figura 3.3: Conexão do CI regulador de tensão fixa.

ficar acima de 8 V e outro detalhe importante é que as pinagens do CI da família 78xx e do 79xx são diferentes, a Figura 3.4 mostra a pinagem dos dois tipos.

Figura 3.4: Pinagem do CI regulador de tensão fixa.

Já o regulador ajustável mais popular é o CI LM317, com corrente máxima de 500 mA e tensão de saída ajustável entre 1,2 V e 37,0 V. Este componente é simples de usar bastam dois resistores externos ao CI para ajustar a tensão de saída, ainda possui proteção interna contra curto circuito e proteção contra aquecimento o que o torna prático e difícil de queimar. O CI LM317 tem uma vasta aplicação. Este CI pode ser usado como fonte fixa, onde a tensão de saída foge ao padrão dos CI's com tensão fixa.

O encapsulamento deste tipo de CI é mostrado abaixo (Figura 3.5), sendo as pinagens bem diferentes da pinagem dos CI's de tensão fixa. Este tipo de CI não tem o pino de terra e sim o pino de ajuste. Outro detalhe importante é que o pino 2 de saída está eletricamente conectado ao dissipador de calor.

Figura 3.5: Pinagem do regulador de tensão ajustável LM317T.

O LM317T é extremamente fácil de usar e requer apenas dois resistores externos para ajus-

tar a tensão de saída, conforme Figura 3.6.

Figura 3.6: Conexão do regulador de tensão ajustável LM317T.

3.8 Comunicação serial

3.8.1 Padrão RS232

Foi criado em 1962 para conectar diretamente dois dispositivos e foi padronizado pela EIA (Associação da Indústria Eletrônica) (ASSOCIATION, 1985; HALSALL, 1996) como um padrão de interface serial para a comunicação de dados. Por volta de 1984 o único padrão de comunicação serial em computadores pessoais IBM-PC era o RS232C (Figura 3.7), depois surgiram o irDa (infra-vermelho), USB entre outros. Para comunicação do microcontrolador com o microcomputador há necessidade de um conversor de sinal (Figura 3.8), sendo o mais utilizado o MAX232.

Figura 3.7: Pinos do conector DB9 do microcomputador

O MAX232 é um circuito eletrônico que converte sinais de uma porta serial para sinais adequados para uso em circuitos microprocessados. O MAX232 amplifica/reduz sinais RX,

Figura 3.8: Diagrama da comunicação do Max232 com os periféricos.

TX, CTX e RTS. A conversão de voltagem (acima de ± 12 V do RS232 para 3,3 V TTL) é gerada por capacitores (normalmente de 10 nF). A Figura 3.9 mostra o nível de conversão.

Nível	TTL	RS232
1	5 VCC	-3 até -18V
0	0 VCC	3 até 18V

Figura 3.9: Níveis de conversão do Max232.

O padrão RS232 transfere dados com velocidade máxima de 0,014 Megabits por segundo (Mbps).

3.8.2 Padrão USB

O Universal Serial Bus (Figura 3.10) (AXELSON, 2005; TAN, 1997) é um tipo de conexão “ligar e usar”, conhecido pelos usuários de computadores como “plug & play”, que permite a conexão de periféricos sem a necessidade de desligar o computador. Surgiu em 1995 com uma parceria entre várias companhias de alta tecnologia (Compaq, Hewlett-Packard, Intel, Lucent, Microsoft, NEC e Philips) e virou um padrão de conectividade. Mesmo com sua onipresença, poucos sabem que o USB possui versões. A atual e mais popular, a 2.0, criada em 2000, transfere dados com velocidade máxima de 480 megabits por segundo (Mbps). A versão 3.0, chamada de SuperSpeed USB, transfere dados com velocidade dez vezes maior, chegando a 4,8 Gbps, a qual permite enviar e receber dados simultaneamente (bidirecional).

3.9 Amplificador operacional

Os primeiros amplificadores operacionais (AOP's) (CIPELLI; SANDRINI, 1984; JÚNIOR, 1988, 1990) foram desenvolvidos na década de 40 através de válvulas, passando a funcionar com transistores a partir da década de 50 e por uma maior evolução na década de 60 com o surgimento dos circuitos integrados. Em 1963, a Fairchild semiconductor® lançou o seu primeiro

Figura 3.10: Pinagem do conector USB.

AOP monolítico $\mu A702$. Contudo o $\mu A702$ apresentou uma série de problemas, como: baixa resistência de entrada; baixo ganho; alta sensibilidade a ruídos e necessidade de alimentação diferenciada (-6 V e $+12\text{ V}$). Então a Fairchild lançou em 1965 o $\mu A709$, sendo considerado o primeiro AOP “confiável” lançado no mercado e em 1968 lançou o $\mu A741$. Vieram outros modelos desenvolvidos por outras empresas, como o ELF351 (National) e CA3140 (RCA), entre outros, sendo este último utilizado no protótipo deste trabalho. A Figura 3.11 representa o símbolo elétrico de um amplificador operacional.

Figura 3.11: Símbolo elétrico de um amplificador operacional.

A alimentação do amplificador operacional é feita de forma simétrica, podendo em alguns casos utilizar uma monoalimentação. Os modos de operação para o amplificador são: sem realimentação; realimentação positiva e realimentação negativa; Os seus terminais são:

- V_+ : entrada não-inversora

- V_- : entrada inversora
- V_{out} : saída
- V_{S+} : alimentação positiva
- V_{S-} : alimentação negativa

4 *Materiais e Métodos*

4.1 Materiais

4.1.1 Materiais utilizados na preparação do Dosímetro Fricke Xilenol Gel

Para a preparação do dosímetro Fricke Xilenol Gel, FXG, foram utilizados: gelatina 300 Bloom (Aldrich), alaranjado de xilenol, sulfato ferroso de amônio, ácido sulfúrico e água Milli-Q, cujas concentrações utilizadas constam na Tabela 4.1. Além destes, foram empregados um termopar para medir a temperatura do dosímetro durante o preparo, um agitador magnético para homogeneizar a solução e vidrarias (béqueres, pipetas e provetas).

Tabela 4.1: Composição e concentrações dos reagentes utilizados na preparação do dosímetro FXG.

Composto	Fórmula Molecular	Peso Molecular (g/mol)	Concentração (mM)
Gelatina	$(C_{17}H_{32}N_5O_6)_x$	402,47	124,38
Xilenol	$C_{31}H_{28}N_2O_{13}SNa_4$	760,58	0,10
Sulf. Ferroso	$Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$	312,12	0,50
Ác. sulfúrico	H_2SO_4	98,07	25,00
Água Milli-Q			

4.1.2 Cubetas para acondicionamento do dosímetro químico FXG

Foi utilizado um lote de cubetas padrão (100 cubetas) de polimetilmetacrilato (PMMA) com $4,50 \times 1,00 \times 1,00 \text{ cm}^3$ usadas em espectrofotometria. A Figura 4.1 mostra a representação da cubeta padrão.

Figura 4.1: Cubeta padrão de $4,50 \times 1,00 \times 1,00 \text{ cm}^3$.

4.1.3 Fonte de radiação

Para a irradiação do dosímetro FXG foi utilizado o seguinte equipamento de teleterapia:

- Fonte de cobalto (^{60}Co) Theratronics/Theratron 780C, com energia média dos fótons de 1,25 MeV, pertencente ao Instituto Ribeirãopretano de Combate ao Câncer (Figura 4.2).

Figura 4.2: Fonte (^{60}Co) Theratronics/Theratron.

4.1.4 Fonte de luz utilizada

No projeto proposto foi utilizado, como fonte de emissão de luz, o LED comercial âmbar de 30° com emissão centrada em 590 nm e largura à meia altura de 14 nm do fabricante OSRAM Opto Semiconductors, conforme Figura 4.3.

4.1.5 Sensor de luz

Quando se usa LED como fonte de radiação, podem ser utilizados detectores do tipo fotodiodo ou fototransistor. A diferença é que o último fornece uma corrente de saída com ordem

Figura 4.3: Espectro de emissão do LED âmbar em (590 nm) e largura à meia altura de 14 nm.

Figura 4.4: (a) Exemplo de um fotodiodo, (b) Símbolo do fotodiodo em um circuito elétrico e (c) Curva característica do fotodiodo com e sem luz incidente.

de grandeza 1,50 a 2,00 vezes maior, embora a resposta seja mais lenta. Isso não significa, necessariamente, que o uso de fototransistor melhore a relação sinal-ruído.

O detector escolhido para esse protótipo é um fotodiodo (Figura 4.4a), pois é barato e de fácil aquisição e apresenta uma boa relação sinal-ruído, sendo adequado para a detecção de sinais luminosos.

4.1.6 Microcontrolador

A unidade central de processamento foi feita usando um microcontrolador fabricado pela Atmel, o Atmega8 AVR, *Automatic Voltage Regulators*, (Figura 4.5). É um microcontrolador de 8 bits de baixo consumo de tecnologia CMOS e arquitetura RISC (Reduced Instruction Set Computer), cuja característica mais interessante é a capacidade de executar uma instrução por ciclo de relógio. Esta taxa de execução de instruções só é possível em virtude da conexão direta dos seus 32 registradores com a unidade lógica aritmética. Esta característica o deixa em van-

Figura 4.5: (a) Encapsulamento DIP e (b) Pinagem do microcontrolador Atmega8.

tagem quando comparado com os concorrentes da família PIC da Microchip Technology. Além do mais, apesar de ser RISC, possui um grande número de instruções (130), o que permite melhor otimização de código de alto nível em Basic. Com o objetivo de maximizar o desempenho e o paralelismo, o microcontrolador AVR segue arquitetura Harvard, em que os barramentos associados às memórias de dados e do programa são distintos. Além disso, utiliza-se a técnica do *pipeline*, em que, enquanto uma instrução começa a ser executada, uma outra é imediatamente buscada na memória do programa para que a mesma possa ser executada no próximo ciclo de relógio.

Este dispositivo foi escolhido devido ao baixo custo e facilidade de programação. Ele pode operar a uma frequência máxima de 16 MHz e é alimentado com 5 V.

4.1.7 Módulo LCD - *Liquid Crystal Display*

Os módulos LCD podem apresentar informações textuais ao usuário da mesma forma que um “monitor”. Existem vários tipos, o mais popular pode exibir duas linhas de 16 caracteres. No projeto utilizou-se o modelo HJ-1602A (Figura 4.6), o qual possui barramento de dados de 8 bits. Foram utilizados 4 pinos do LCD para transmissão de dados e 2 pinos para controle.

O módulo LCD tem 16 pinos para interface com outros dispositivos eletrônicos, conforme Figura 4.7.

Figura 4.6: Módulo LCD 16 × 2 para mostrar os resultados das leituras.

No	Name
1	VSS (GND supply)
2	VCC (+5V supply)
3	VEE (contrast adjst)
4	RS
5	R/W
6	E
7	DB0
8	DB1
9	DB2
10	DB3
11	DB4
12	DB5
13	DB6
14	DB7
15	LED(+)
16	LED(-)

Figura 4.7: Referência da Pinagem do Módulo e circuito do LCD 16 × 2.

4.1.8 Comunicação RS 232

Todo dispositivo de controle requer uma interface para que se possa fazer o monitoramento das informações. Escolheu-se a comunicação serial RS-232 visto que o microcontrolador Atmega8 já tem implementado internamente funções que facilitam o acesso a porta serial. Ao invés de utilizar a porta serial do computador, foi utilizado um cabo conversor de serial para USB, dando a maior facilidade em encontrá-la nos computadores modernos.

O microcontrolador Atmega8 trabalha com tensões 0 e 5 V para sinalizar os níveis lógicos em uma comunicação serial e o padrão adotado trabalha com tensões de -12 e +12 V indicando níveis lógicos 1 e 0 respectivamente. Fez-se necessário então utilizar um CI para realizar essa conversão de tensões. O CI que atendeu as especificações foi o MAX232, fabricado pela MAXIM, cuja configuração de pinos e circuito de operação típico estão mostrados na Figura 4.8. Na Figura 4.9 está o circuito esquemático mostrando a ligação do Atmega8 e o MAX232.

4.1.9 Ferramenta de Desenvolvimento

Antes de utilizar o microcontrolador é necessário conhecer os procedimentos para acessá-lo e programá-lo, usando um computador. Para tais tarefas utilizou-se para desenvolvimento do

Figura 4.8: Configuração de pinos e circuito típico.

Figura 4.9: Ligação básica entre Atmega8 e o CI MAX232.

código fonte e simulação o ambiente gráfico do software BASCOM-AVR[®] (Figura 4.10), que é um compilador de códigos fontes em linguagem Basic, o programador (gravadora) GPAVR (Figura 4.12) e o software PonyProg (Figura 4.13) para transferir o código fonte compilado para o microcontrolador.

O software BASCOM-AVR[®] é uma excelente ferramenta para o primeiro contato com o microcontrolador AVR, já que em função de ser uma linguagem de alto-nível diversas funções já estão prontas, como a de comunicação serial, display LCD, display gráfico, RS232, dentre outras. A versão demo pode ser baixada gratuitamente no site www.mcselec.com que tem suas limitações, como compilar até 4 Kb de código fonte.

Figura 4.10: BASCOM-AVR[®], utilizado para o desenvolvimento do código fonte para micro controlado.

O BASCOM-AVR[®] permite aos usuários a programação em Assembly, e até mesmo a mesclar entre Assembly e Basic.

No próprio ambiente de desenvolvimento a ferramenta BASCOM-AVR, permite simular (Figura 4.11) o sistema afim de que possa encontrar eventuais erros de lógica na programação.

Figura 4.11: Tela do software BASCOM-AVR[®], para simulação do código fonte.

Após a compilação e simulação do arquivo fonte o compilador do BASCOM gera um arquivo hexadecimal (*.hex), o qual deve ser gravado no microcontrolador. Para tal gravação faz-se o uso do software PonyProg (Figura 4.12) e do circuito programador GPAVR (Figura 4.13). Este programador fica conectado na porta serial do microcomputador.

Um “programador” pode ser entendido como sendo o circuito eletrônico que realiza a interface entre o microcontrolador e o computador, sendo em geral projetados de acordo com as

Figura 4.12: Programa PonyProg, para gravação do código .hex no microcontrolador.

particularidades técnicas de cada microcontrolador. A interface de programação usa os pinos SPI (Serial Peripheral Interface) do microcontrolador, que é um tipo de comunicação serial síncrona muito utilizada por sistemas embarcados e, no caso do Atmega8, é o padrão para interface de programação. Na figura 4.13 encontra-se o programador GPAVR utilizado para a montagem do leitor.

Figura 4.13: Circuito programador GPAVR para gravação no microcontrolador.

Para o desenvolvimento da placa lógica do sistema Radiare IV, foi utilizada a ferramenta P-CAD 2004 (Figura 4.14). Esta é altamente versátil e flexível para criação e impressão de projetos de placas de circuitos eletrônicos.

4.1.10 Equipamento utilizado para testes de estabilidade do novo Leitor

A avaliação das respostas do dosímetro FXG foi feita utilizando-se um espectrofotômetro Beckman/DU640 do laboratório de Fotobiofísica do Departamento de Física da FFCLRP e comparadas com o novo leitor. A Figura 4.15a traz a ilustração do Radiare III e na Figura 4.15b temos a imagem do novo protótipo, Radiare IV.

Figura 4.14: Ferramenta do programa P-CAD 2004 utilizada para projeto de placas para os circuitos eletrônicos.

Figura 4.15: (a) Radiare III e (b) Radiare IV.

4.2 Métodos

4.2.1 Montagem do Radiare IV

A partir dos objetivos propostos, foi montado um *setup* para obtenção das medidas. Como apresentado na Figura 4.16.

O “módulo do leitor digital”, assim chamado, é a parte principal da nova versão do Radiare IV, pois é através deste módulo que a aquisição do sinal passa a ser automatizada. Seu funcionamento é basicamente fazer a aquisição automática do sinal através do pino 24 (PC1-ADC1) do microcontrolador, que o digitaliza por meio de um conversor A/D interno de 10 bits, o que significa que se tem uma resolução de 1024 pontos. Sendo já definido um valor de referência no pino 21 (AREF) igual a 5 V, tem-se como retorno o valor de 1023 e quando tem-se 0 o retorno será 0. Esta idéia prossegue durante toda a faixa de conversão de forma linear, ou seja, quando a tensão de 2,5 V estiver presente na entrada do conversor A/D, tem-se o valor de 512 e assim sucessivamente. Estes sinais são armazenados na memória do microcontrolador e apresentados

Figura 4.16: Diagrama da montagem para obtenção das medidas.

em valores de absorbância em um display de cristal líquido (LCD). No microcontrolador há uma rotina para cálculo do valor de absorbância, aplicando a equação de Lambert-Beer. Estes dados também são disponibilizados na interface serial do equipamento, assim permitindo a transferência de dados digitais para o microcomputador.

Tomou-se o cuidado de criar e testar o circuito eletrônico do módulo, primeiramente em um *protoboard*, conforme pode ser visto na Figura 4.17.

Figura 4.17: Módulo leitor digital (teste) e o display LCD do protótipo IV.

Outro módulo denominado “Módulo Detector” foi projetado de modo garantir uma boa estabilidade no sinal do fotodiodo (detector).

A corrente gerada pelo fotodiodo passa por um conversor de corrente para tensão e depois sofre um ganho. O sinal de saída deste primeiro estágio passa por um filtro notch centrado em

60 Hz, para eliminar o ruído de maior intensidade, logo em seguida o sinal é mais uma vez amplificado, por um amplificador operacional de ganho ajustável. Quando não há luz incidindo no fotodiodo a tensão resultante é nula e na máxima intensidade de luz sobre o fotodiodo, a saída é de 5 V. Para minimizar ainda mais o ruído elétrico, colocou-se um filtro passa-baixa neste estágio, cortando aproximadamente em 2,65 MHz. Então nesta faixa de tensão de 0 a 5 V, o sinal é enviado ao “módulo do leitor digital”.

A fonte de alimentação na nova placa foi construída a partir de um transformador que reduz a tensão elétrica da rede de 127/220 V_{ac} para 9 V_{ac}, para retificar a onda senoidal foi utilizado uma ponte retificadora de capacidade 1 A e, para o filtro, capacitores eletrolíticos de 2200 µF/25V. Foram utilizados os reguladores de tensão LM7806 e LM7906 para regular a tensão em 6 V positivo e 6 V negativo, para os dois amplificadores operacionais de entrada (conversor corrente/tensão e o controle de ganho). Como o Atmega8 trabalha com 5 V, foi utilizado um circuito integrado LM7805, que aceita até 35 V em sua entrada e regula a sua saída em 5 V para alimentá-lo.

Um módulo de proteção e segurança foi inserido no circuito eletrônico para interrompê-lo em situações anormais de corrente, como curto-circuito ou sobrecargas de longa duração.

Após os módulos necessários para o funcionamento do circuito serem definidos, utilizou-se da ferramenta P-CAD 2004 para criação do layout e impressão do circuito da placa do Radiare IV, Figura 4.18.

Figura 4.18: *Layout* da placa gerada pela ferramenta P-CAD 2004.

Onde:

1. Módulo de alimentação do circuito com sistema de proteção contra situações anormais de corrente elétrica;
2. Módulo Detector que recebe o sinal do fotodiodo;
3. Módulo Digital faz a aquisição do sinal do módulo detector, realiza controle do display, teclado e comunicação serial.

A saída para comunicação é realizado através da porta serial, podendo ser utilizado um cabo conversor de serial para USB, possibilitando trabalhar com a comunicação USB, que predomina nos computadores atuais.

4.2.2 Irradiação do Dosímetro

Dispondo das massas apresentadas na Tabela 4.1, a água Mili-Q foi aquecida e a gelatina foi adicionada sob agitação constante para maior homogeneidade da solução. Enquanto isso, o restante da água Mili-Q foi adicionada ao alaranjado de xilenol, juntamente com o ácido sulfúrico. Após obtenção de uma solução alaranjada esta foi adicionada ao béquer principal, sob aquecimento e agitação constante. O sulfato ferroso foi o último reagente a ser adicionado à solução, já homogênea e alaranjada. Preparada a solução Fricke, esta foi inserida nas cubetas e a seguir levadas ao freezer (por 15 minutos) para que a gelatina alcançasse a consistência adequada. Uma vez que o dosímetro estava no estado de gel, as cubetas estavam prontas para serem irradiadas.

As cubetas foram irradiadas com feixes de fótons de 1,25 MeV e dose absorvidas de 0,1 à 9,0 Gy. A temperatura da sala de irradiação sempre esteve constante e próxima a $24,4 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

4.2.3 Curvas de calibração

Para a utilização dos dosímetros é necessário conhecer seus comportamentos. O comportamento mais simples é aquele da resposta do dosímetro em função da dose absorvida, também conhecido por curva de calibração. Neste trabalho, uma curva de calibração para o FXG foi feita, para comprovação da adequabilidade do uso deste dosímetro para medidas das doses absorvidas dos feixes de fótons de 1,25 MeV, utilizados nas irradiações.

Vinte e uma cubetas padrão foram preenchidas com o dosímetro FXG para 7 valores de dose absorvida de 0,1, 0,5, 1,5, 3,0, 4,5, 6,0 e 9,0 Gy. Para a obtenção de um valor médio das medidas, foram utilizadas 3 cubetas para cada valor da dose absorvida. Foram feitas leituras das cubetas antes e após as irradiações para obter respectivamente os valores de referência para a linha de base das medidas e valores cujas intensidades seriam relativas aos valores de dose apresentados.

4.2.4 Medidas com o sistema desenvolvido

Foram realizadas as leituras de absorvância das cubetas (depois de irradiadas) com o leitor Radiare III e com o protótipo Radiare IV, no comprimento de onda de 590 nm.

Para leituras no Radiare IV, as cubetas foram colocadas na área de medição (Figura 4.19) e com o equipamento ligado a aquisição das medidas era obtida pelo circuito detector (Figura 4.19) e apresentado em valores de absorvância no display LCD para o usuário.

A área de medição é a parte do circuito onde são acomodadas as cubetas sobre a tampa superior do Radiare IV, que contém um adaptador entre os orifícios do LED e do fotodiodo, conforme figura abaixo, a fim de minimizar o efeito da radiação refletida na superfície da cubeta. A luz emitida pelo LED atravessa a cubeta com a amostra e é detectada pelo fotodiodo.

Para o valor de referência utiliza-se uma cubeta com solução não irradiada, sendo seu valor empregado para cálculo da absorvância conforme a equação 3.3.

Figura 4.19: Área de medição e adaptador que acomoda a fonte emissora de luz, nos protótipos III e IV.

4.2.5 Fluxograma da operacionalidade do RADIARE IV

Fluxograma é um tipo de diagrama, e pode ser entendido como uma representação esquemática de um processo, muitas vezes feito através de gráficos que ilustram de forma descomplicada a transição de informações entre os elementos que o compõem. Podemos entendê-lo, na prática, como a documentação dos passos necessários para a execução de um processo qualquer. Na Figura 3.7 pode se visualizar o fluxograma do protótipo proposto.

Figura 4.20: Fluxograma de operacionalidade do protótipo proposto, Radiare IV. Legenda: Botão 1 – Armazenar ponto(s); Botão 2 – Visualizar ponto(s); Botão 3 – Reiniciar processo; Botão 4 – Enviar ponto(s) para a porta de comunicação.

5 *Resultados e Discussões*

5.1 Radiare IV

A partir dos módulos definidos, criados e testados, o protótipo forneceu resultados com precisão satisfatória.

A Figura 5.1a mostra a placa principal, a qual desempenha a função de detecção, processamento e armazenamento do sinal e comunicação com o display e com o computador externo.

A Figura 5.1b mostra o circuito com o *display*, o qual tem a função de mostrar os valores obtidos e armazenados durante as medidas. Na Figura 5.2 temos protótipo Radiare IV finalizado.

O Radiare IV é um novo protótipo otimizado a partir de um protótipo anteriormente construído pelo grupo, que era constituído basicamente de uma fonte de luz (LED âmbar 30°), um fotosensor do tipo PN de silício, com intervalo útil de 420 a 675 nm e pico de absorção em 565 nm, um display de LCD e seus circuitos de controle. A indicação de 30° refere-se ao ângulo de abertura do cone luminoso do LED (fonte) em questão.

Figura 5.1: (a) Placa principal do Radiare IV e (b) Placa com o display e botões com funções para armazenar o sinal, mostrar o valor em absorbância, reiniciar e enviar para a porta serial.

Figura 5.2: Protótipo Radiare IV, no qual foram implementados os códigos-fontes tanto para aquisição das leituras das amostras, como também aquele para o calculo da equação de Lambert-Beer.

5.2 Código Fonte

A ferramenta de desenvolvimento BASCOM-AVR mostrou-se bastante produtiva na programação do código fonte e simulação. A simulação é fácil de ser utilizada e de grande ajuda, pois facilita a programação, permitindo que seja feita em qualquer computador, não necessitando do microcontrolador para os testes mais básicos. Na programação do Atmel Atmega8 uma característica particular é que primeiramente é necessário definir como as portas serão utilizadas, se é para entrada de dados ou para saída de dados.

A seguir os trechos dos códigos na linguagem basic, utilizados no Atmega8. Na parte (a) é apresentado o trecho do código referente à aquisição das leituras das amostras e na parte (b) o trecho referente ao cálculo da absorbância.

<pre> 189 For Ch = 0 To 9 190 Leitura = Getadc(1) 191 C = C + Leitura 192 Waitms 100 193 Next 194 Leitura = C / 10 195 C = Leitura </pre>	<pre> 171 'Calculando a referência 172 Vr_temp = 5 * 10 173 Vr_temp = Vr_temp / 1023 174 Lowerline 175 Lcd "A=" 176 Locate 2 , 9 177 Lcd "R=" 178 Locate 2 , 11 179 Lcd Fusing(vr_temp , "#.####") 180 'Calculando a Absorbância 181 Vr_temp = Vr_temp / C 182 C = Log(vr_temp) 183 Locate 2 , 3 184 Lcd Fusing(c , "#.####") </pre>
(a)	(b)

Figura 5.3: (a) Parte do código-fonte para aquisição de leituras das amostras. e (b) Parte do código-fonte para cálculo da equação de Lambert-Beer.

5.3 Reprodutibilidade do Radiare IV

O desempenho do Radiare IV, quanto à reprodutibilidade, apresentou-se muito satisfatório e com bastante acurácia, tendo um desvio padrão relativo máximo de 1%. Nos dez experimentos realizados as leituras do Radiare IV foram comparadas com as de um multímetro da marca Tektronix/DMM914. A Figura 5.4 mostra o resultado dessa comparação num gráfico semi-log, com duas curvas representando tensão no eixo-y e densidades ópticas no eixo-x. As densidades ópticas lidas estão no intervalo 0,26 à 1,86, correspondentes aos passos 7 à 12 do sensitômetro. Os 6 primeiros (valores de densidade menores que 0,26) e os 9 últimos (valores de densidade maiores que 1,86) passos foram excluídos por estarem fora do limite de detecção inferior e superior do fotodiodo.

Figura 5.4: Gráfico da tensão em função da densidade óptica para averiguação da reprodutibilidade do Radiare IV e do multímetro Tektronix DMM914.

5.4 Curvas de calibração

Para verificar a resposta do Radiare IV foram realizadas curvas de calibração com o dosímetro FXG aplicando feixe de fótons, Figura 5.5. Através desta figura verificamos que a resposta do Radiare IV condiz com o esperado, apresentando linearidade, já que a resposta do dosímetro Fricke é proporcional a dose aplicada. Estes resultados acabam por validar a aplicação do protótipo desenvolvido neste trabalho para leitura de dosímetros géis e quaisquer outras substâncias das quais se possa obter absorbância.

Figura 5.5: Absorbâncias do FXG em função da dose absorvida em 590 nm para os protótipos Radiare III e IV.

A partir do circuito e programas desenvolvidos, os valores resultantes dos cálculos das absorbâncias puderam ser visualizados no cristal LCD acoplado ao módulo leitor e ao aparelho Radiare III, constituindo-se agora no protótipo Radiare IV. Assim, foi otimizada a maneira de como anteriormente eram feitas as medidas, melhorando a portabilidade do aparelho e automatizando a etapa de cálculos para obtenção das absorbâncias. Para avaliar o desempenho do módulo digital, amostras de FXG foram irradiadas com doses absorvidas de 0,1 à 9,0 Gy, através de uma fonte (^{60}Co) com feixe de energia de 1,25 MeV (Theratronics/Theratron 780C), mantendo-se as mesmas condições ambientais durante as leituras. Na Figura 5.5, tem-se as absorbâncias inferidas com os protótipos Radiare III (que utiliza o multímetro) e Radiare IV (com o módulo digital) em função das doses absorvidas, das quais pode-se notar que o circuito e programa desenvolvidos apresentam o comportamento esperado. Para cada valor de dose absorvida foram irradiadas três amostras de FXG cuja incerteza máxima ficou em torno de 1%.

6 *Conclusões*

A combinação do microcontrolador Atmega8 com o módulo detector de sinal do fotodiodo foi realizado com sucesso, obedecendo aos princípios teóricos. Os componentes eletrônicos utilizados estão disponíveis comercialmente, além de serem de baixo custo, o que facilita a montagem, produção e aprimoramento do protótipo.

O custo do Radiare IV foi estimado em torno de US\$ 150,00, o qual é bem inferior ao de qualquer instrumento comercial.

Quanto à análise da reprodutibilidade e a da resposta do leitor para uma curva de calibração, o leitor apresentou um desempenho satisfatório quanto a redução do tempo de leitura, obtenção direta das absorbâncias e melhoria da sua portabilidade, quando comparado com o Radiare III, cujos resultados já tinham sido corroborados com espectrofotômetros. As características destacadas fazem do Radiare IV uma ferramenta alternativa economicamente viável para leituras de géis ou quaisquer outras substâncias das quais seja possível obter a absorbância.

Por se tratar de um protótipo barato e de eletrônica e princípio físico simples, o Radiare IV pode ser facilmente aplicado em laboratórios de ensino de física para fins didáticos.

Finalmente, por ser microcontrolado e portátil, dispensa o uso de microcomputador e também possibilita a realização de análise em campo.

Referências Bibliográficas

- ARAÚJO, M. C. U. et al. Um fotômetro de fluxo para análises clínicas a base de um diodo emissor de luz bicolor. *Química Nova*, scielo, v. 20, p. 137–145, 1997. ISSN 0100-4042.
- ASSOCIATION, E. I. *EIA standard RS-232-C interface between data terminal equipment and data communication equipment employing serial data interchange*. [S.l.], 1985.
- ATTIX, F. H. *Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry*. [S.l.]: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2004.
- AXELSON, J. *USB complete: everything you need to develop custom USB peripherals*. Third edition. [S.l.]: Lakeview Research LLC, 2005.
- BERO, M. A.; GILBOY P. M. GLOVER, H. M. E.-m. W. B. Tissue equivalent gel for non-invasive spatial radiation dose measurements. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, v. 167-167, p. 820–825, 2000.
- BOYLESTAD, R.; NASHELSKY, L. *Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos*. [S.l.]: Rio de Janeiro, LTC, 1999.
- CIPELLI, A. M. V.; SANDRINI, W. J. *Desenvolvimento de Circuitos Eletrônicos*. [S.l.]: São Paulo: Érica, 1984.
- CLOSE, C. M. *The Analysis of Linear Circuits*. [S.l.]: New York: Harcourt Brace Jovanovich, 1967.
- COSTA, R. T. *Avaliando a viabilidade do uso do dosímetro Fricke modificado na radioterapia*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, FFCLRP/DFM, 2001.
- CRISP, J. *Introduction to Microprocessors and Microcontrollers*. [S.l.]: Ed. Newnes (Elsevier), 2004.
- DASGUPTA, P. K. et al. Light emitting diode based flow-through optical absorption detectors. *Talanta*, v. 40, n. 1, p. 53–74, 1993.
- DASGUPTA, P. K. et al. Light emitting diode-based detectors: Absorbance, fluorescence and spectroelectrochemical measurements in a planar flow-through cell. *Analytica Chimica Acta*, v. 500, n. 1-2, p. 337–364, 2003. ISSN 0003-2670. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6TF4-48XCJ80-8/2/0cc0e29c3bfb28e2db2f349af8ac8543>>. Acesso em 20/08/2010>.
- DYER, J. R. *Aplicações da espectroscopia de absorção dos compostos orgânicos*. [S.l.]: Editora Edgar Blücher Ltda, São Paulo, 1965.

FELIPE, D. S. *Desenvolvimento, teste e aplicação de protótipo para dosimetria da solução Fricke modificada*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, FFCLRP/DFM, 2003.

FRICKE, H.; MORSE, S. The chemical action of roentgen rays on dilute ferrous sulphate solutions a measure of dose. *American Journal Roentgnology Radium Therapy and Nuclear Medicine*, v. 18, p. 430–432, 1927.

GAIÃO, E. d. N. et al. Um fotômetro multi-led microcontrolado, portátil e de baixo custo. *Química Nova*, scielo, v. 28, p. 1102–1105, 2005. ISSN 0100-4042.

GAY, C.; COLLINS, J.; GEBICKI, J. M. Determination of iron in solutions with the ferric-xlenol orange complex. *Analytical Biochemistry*, v. 273, n. 2, p. 143–148, 1999. ISSN 0003-2697. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6W9V-45HR6G9-3P/2/aa0a5a6f88305931082b94e477b4cd62>>. Acesso em 23/04/2010>.

HALSALL, F. *Data Communications, Computer Networks and Open Systems*. [S.l.]: Addison-Wesley, 1996.

JOHNS, H. E.; CUNNINGHAM, J. R. *The Physics of Radiology*. Fourth. [S.l.]: Charles C. Thomas, 1983.

JÚNIOR, A. P. *Amplificadores operacionais e filtros ativos: teoria, projetos, aplicações e laboratório*. [S.l.]: São Paulo: Makron Books do Brasil Editora Ltda, 1988.

JÚNIOR, A. P. *Amplificadores operacionais e filtros ativos*. [S.l.]: McGray-Hill Ltda, 1990.

KHAN, F. M. *The Physics of Radiation Therapy*. Third edition. [S.l.]: Lippincott Williams & Wilkins, 2003.

KLEITZ, W. *Microprocessor and Microcontroller Fundamentals: The 8085 and 8051 Hardware and Software*. [S.l.]: Prentice Hall, 1997.

MALVINO, A. P. *Eletrônica I*. [S.l.]: São Paulo: McGraw-Hill, 1987.

MIYAZAKI, E.; ITAMI, S.; ARAKI, T. Using a light-emitting diode as a high-speed, wavelength selective photodetector. *Review of Scientific Instruments*, v. 69, p. 3751–3754, 1998.

PALM, A.; MATTSO, O. Influence of sulphuric acid contaminants on fricke dosimetry. *Physics in Medicine and Biology*, v. 45, p. 111–114, 2000.

PASQUINI, C.; JR., R.; M., I. *Química Nova*, v. 7, p. 24, 1984.

PEREIRA, E. A.; CARDOSO, A. A.; DASGUPTA, P. K. Gota suspensa para avaliação de aldeído total no ar interno e externo do ambiente. *Química Nova*, scielo, v. 24, p. 443–448, 2001. ISSN 0100-4042.

ROCHA, F. R. P.; MARTELLI, P. B.; REIS, B. F. Simultaneous in-line concentration for spectrophotometric determination of cations and anions. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, scielo, v. 15, p. 38–42, 2004. ISSN 0103-5053.

SEDRA, A. S.; SMITH, K. C. *Microeletrônica*. [S.l.]: São Paulo: Makron Books, 2000.

- SHUR, M. *Physics of Semiconductor Devices*. [S.l.]: Prentice-Hall Internacional: Englewood Cliffs, 1990.
- SILVA, S. A.; OLIVEIRA, R. *Manual de análises físico-químicas de Águas de Abastecimento e Residuárias*. [S.l.]: DEC/CCT/UFGP, Campina Grande, 2001.
- TAN, W. M. *Developing USB PC peripherals*. First edition. [S.l.]: Annabooks, 1997.
- TOBIAS, C. A.; HART, E. J.; PLATZMAN, R. L. Hugo fricke on the occasion of his seventieth birthday. *Radiation Research*, v. 17, n. 3, p. 253–253, 1962. Disponível em: <<http://www.rrjournal.org/doi/abs/10.2307/3571089>>. Acesso em 23/04/2010>.
- ZILLER, R. M. *Microprocessadores – Conceitos Importantes*. [S.l.]: Edição do autor, Florianópolis, 2000.