



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA



PAULO SÉRGIO DE ALMEIDA GONÇALVES JÚNIOR

**ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA DA ANÁLISE
GRANULOMÉTRICA DE SOLOS DE UM SISTEMA
EXCITADO POR LEDs**

São Carlos
2014

PAULO SÉRGIO DE ALMEIDA GONÇALVES JÚNIOR

ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA DA ANÁLISE
GRANULOMÉTRICA DE SOLOS DE UM SISTEMA
EXCITADO POR LEDs

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à Escola de Engenharia de São Carlos, da
Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com ênfase em
Eletrônica

Orientador: Prof. Dr. Adilson Gonzaga

São Carlos
2014

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

A444e Almeida Gonçalves Júnior, Paulo Sérgio de
ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA DA ANÁLISE
GRANULOMÉTRICA DE SOLOS DE UM SISTEMA EXCITADO POR LEDs
/ Paulo Sérgio de Almeida Gonçalves Júnior; orientador
Adilson Gonzaga. São Carlos, 2014.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com
ênfase em Eletrônica) -- Escola de Engenharia de São
Carlos da Universidade de São Paulo, 2014.

1. Análise granulométrica de solos. 2. Lei de
Beer-Lambert. 3. Lei de Stokes. 4. LEDs . I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Paulo Sérgio de Almeida Gonçalves Júnior

Título: “Estudo da viabilidade técnica da análise granulométrica de solos de um sistema excitado por LEDs”

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado

em 28/11/2014,

com NOTA 7,0 (SETE, ZERO), pela Comissão Julgadora:

Prof. Associado Adilson Gonzaga - (Orientador - SEL/EESC/USP)

Dr. Washington Luiz de Barros Melo - (EMBRAPA)

Dr. Renato Varoto - (SEL/EESC/USP)

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Prof. Associado Homero Schiabel

Dedico este trabalho aos meus pais, que sempre me apoiaram e foram fundamentais na minha formação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, pela educação que sempre me deram, pelo amor e apoio nessa jornada da minha vida. A minha irmã e a minha família, que juntamente com meus pais, foram fundamental na minha formação como pessoa nas etapas da minha vida.

Aos meus amigos de Universidade, e aos que estiveram comigo nos Estados Unidos, durante meu intercâmbio, que me ajudaram a crescer e a conhecer uma outra realidade de mundo.

A todos os professores da Universidade de São Paulo que tiveram contribuição em minha formação. Ao Professor Dr. Adilson Gonzaga pela orientação e atenção, durante a graduação e, especialmente neste trabalho.

Agradeço à Embrapa Instrumentação pelo apoio estrutural, laboratoriais e de pessoal que proporcionaram as condições para a realização deste trabalho.

E a todos que de alguma forma contribuíram para a conclusão deste trabalho.

*“Temos o destino que merecemos. O nosso destino
está de acordo com os nossos méritos.”*

Albert Einstein

RESUMO

GONÇALVES, P. S. A. G. **ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA DA ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DE SOLOS DE UM SISTEMA EXCITADO POR LEDs**. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

Com o avanço da tecnologia, foram desenvolvidos métodos de análise granulométrica de solos, nos quais a análise pudesse ser realizada cada vez mais rápida e eficientemente. Porém a maior parte destes métodos desenvolvidos apresentam altos custos envolvidos ou se utilizam de uma fonte de emissão radiativa para a análise. Este trabalho propõe um novo método de análise, baseado no mesmo princípio do Método por atenuação de raios gama, porém utilizando LEDs como fonte de emissão não radiativa, e tem por objetivo analisar a viabilidade técnica do emprego deste método na análise granulométrica de solos por meio do desenvolvimento de um sistema de aquisição desenvolvido na Embrapa Instrumentação. As intensidades dos LEDs são capturadas por fotodiodos, chaveados por um sistema controlado por um microcontrolador, e estes dados são salvos em memória e posteriormente importados para o computador por meio de um software de interface desenvolvido, processados e mostrados em forma gráfica. As curvas obtidas foram comparadas ao comportamento teórico descrito pelas Leis de Beer-Lambert e Stokes, utilizadas no método por atenuação de raios gama e os resultados mostraram que este novo método pode ser empregado na análise granulométrica de solos.

Palavras-chave: Análise granulométrica de solos; Lei de Beer-Lambert; Lei de Stokes; LEDs

ABSTRACT

GONÇALVES, P. S. A. **Study of the technical feasibility a Soil Particle size analyzer using LEDs**. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

With the advance of technology, methods of soil particle size analysis were developed, where the time of analysis was reduced and made more efficient. Most of these methods have high costs involved or are used as a source of radioactive emission. The purpose of this project is to propose a new method based on the same principle of the gamma-ray attenuation method, but instead using LEDs as a source of nonradioactive emission. It aims to examine the technical feasibility of the usage of this method for soil particle size analysis, through the development of an acquisition system developed at Embrapa Instrumentação. The intensities of LEDs are captured by photodiodes, controlled by a microcontroller. This data is saved in memory and later imported to the computer via a software interface developed, processed and displayed in a graphical form. The curves obtained were compared to the theoretical behavior described by the Beer-Lambert Law and the Stokes Law, which are the fundamentals used for the gamma-ray attenuation method. The results exhibit that this new method can be used in the particle size analysis of soils.

Keywords: Soil particle size analysis; Beer-Lambert law; Stokes law; LEDs

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Peneiras utilizadas em análise granulométrica.	20
Figura 2 - Diagrama esquemático do hidrômetro da ASTM, modelo 152H.	23
Figura 3 - Analisador granulométrico automatizado de solos.	24
Figura 4 - Incidência da luz em 2 tubos de ensaios com diferentes concentrações. .	26
Figura 5 - Fenômenos ocorrentes na interação luz-matéria.	27
Figura 6 - LEDs Comerciais.	33
Figura 7 - Espectro Eletromagnético de frequências.	33
Figura 8 - Decomposição da luz branca.	34
Figura 9 - Fotodiodo Comercial.	35
Figura 10 - Diagrama de blocos do projeto.	36
Figura 11 - LED Branco 3mm.	37
Figura 12 - Intensidade Relativa vs. Comprimento de onda do LED branco.	38
Figura 13 - Torre de um Sistema de Aquisição.	39
Figura 14 - Controle dos LEDs.	40
Figura 15 - Circuito de Chaveamento dos Fotodiodos.	41
Figura 16 - Detalhamento do CI4066.	42
Figura 17 - Detalhamento do circuito Demultiplexador.	43
Figura 18 - Circuito de Condicionamento do Sinal dos Fotodiodos.	44
Figura 19 - Pinagem do PIC 16F876A.	45
Figura 20 - Protocolo Comunicação Serial.	46
Figura 21 - Circuito de Comunicação.	47
Figura 22 - Circuito Regulador de Tensão.	48
Figura 23 - Fluxograma do Firmware gravado no microcontrolador.	49
Figura 24 - Tela de Inteface do usuário.	50
Figura 25 - Tela gráfica do software de interface.	51
Figura 26 - Calibração do Sistema.	52
Figura 27 - Curva da Sedimentação do Leite de Magnésia.	54
Figura 28 - Curva da Sedimentação do Solo TRE.	55
Figura 29 - Curva da Sedimentação do Solo LVE.	56
Figura 30 - Curvas do LED 1 para as três amostras.	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características de LEDs encontrados comercialmente	34
Tabela 2 - Características do PIC 16F876A.....	45
Tabela 3 - Intensidade Padrão dos LEDs.....	53
Tabela A-1 - Tabela de Descrição da pinagem do PIC16F876A.....	63

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	Apresentação.....	16
1.2	Objetivos.....	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	Análise Granulométrica.....	18
2.1.1	<i>Generalidades</i>	18
2.1.2	<i>Análise granulométrica de solos</i>	18
2.1.3	<i>Métodos de Sedimentação</i>	20
2.2	Interação da Luz com a Matéria	25
2.2.1	<i>Fotometria</i>	25
2.2.2	<i>Transmitância e absorbância</i>	26
2.2.3	<i>Reflexão e espalhamento</i>	27
2.2.4	<i>A Lei de Beer-Lambert</i>	28
2.3	A Lei de Stokes.....	30
2.4	LED como fonte de emissão.....	32
3	MATERIAL E MÉTODOS	36
3.1	Projeto e implementação do hardware	37
3.1.1	<i>Disposição e controle dos LEDs</i>	37
3.1.2	<i>Sistemas de Aquisição</i>	40
3.1.3	<i>Comunicação entre PIC e Computador</i>	44
3.1.4	<i>Conversor Analógico Digital</i>	47
3.1.5	<i>Alimentação dos Dispositivos</i>	48
3.1.6	<i>Firmware</i>	48
3.2	Software de Aquisição	49
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
5	Conclusão.....	58
6	Sugestões para trabalhos Futuros.....	58
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
	APÊNDICE A – Descrição da pinagem do PIC 16F876A.....	63

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

A Ciência do Solo surgiu há cerca de 150 anos, primeiramente como um subproduto da pesquisa em agricultura, porém desenvolveu-se de forma mais intensa após a segunda guerra mundial, estimulando desde então mudanças e novas oportunidades na área. É a Ciência que estuda o solo como recurso natural da superfície da terra, incluindo a formação do solo (pedogênese), sua classificação e cartografia e ainda as propriedades físicas, químicas e biológicas, bem como a relação destas propriedades com o uso e gestão dos solos (MARTIN NETO, 2007).

A qualidade de um tipo específico de solo é definida como a capacidade deste funcionar como ecossistema natural ou manejado para sustentar a produtividade animal e vegetal, manter a qualidade da água e do ar e suportar o crescimento humano. Pesquisas na área têm mostrado a importância de se categorizar os tipos de solo e suas propriedades em relação ao uso da terra, especialmente para fins agrícolas (Doran & Parkin, 1994).

O desenvolvimento de métodos que permitam avaliar a sustentabilidade de diferentes agroecossistemas, a partir de específicas propriedades do solo, é um dos maiores desafios enfrentados para o desenvolvimento de uma agricultura sustentável. Alguns dos parâmetros mais utilizados como indicadores de qualidade física do solo são a resistência tênsil de agregados, a densidade do solo, a textura do solo e a curva de retenção da água no solo (MARTIN NETO, 2007).

A análise granulométrica consiste no estudo da textura do solo, o qual é caracterizado pela determinação das dimensões das partículas que constituem determinada amostra e no tratamento estatístico dessa informação, com o objetivo de se obter as proporções relativas dos componentes presentes no solo em estudo. Atualmente, uma grande variedade de técnicas e métodos em análise granulométrica de solos está disponível na literatura, desde métodos mais tradicionais, como os da pipeta e do hidrômetro de Bouyoucos, desenvolvidos na década de 20, a métodos novos e mais elaborados, desenvolvidos com a evolução tecnológica, tais como o método de difração a laser, método por atenuação de raios X, por atenuação de raios gama, e espalhamento estático e dinâmico da luz (Dias, 2004).

Porém, a maioria destes métodos apresentam desvantagens, como requererem uma quantidade substancial de tempo para análise, fazerem uso de uma fonte de emissão radiativa ou apresentarem um alto custo envolvido.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal o estudo da viabilidade técnica da análise granulométrica baseada no mesmo princípio de absorção do método por raios gama, porém utilizando o processo de detecção por transmitância óptica, no qual a fonte de emissão é composta por LEDs.

Com este intuito, foi projetado um sistema multi-amstral de análise granulométrica, baseado em um protótipo já existente na Embrapa Instrumentação, que possui apenas um sistema de amostra, porém um estudo de sua viabilidade técnica através da análise do comportamento dos dados de acordo com as Leis de Beer-Lambert e Stokes ainda não foi realizado.

Assim, pretende-se ampliar o número de amostras para quatro, cuja aquisição de dados possam ocorrer simultaneamente, possibilitando elevar a quantidade de amostras analisadas num determinado período de tempo e avaliar a empregabilidade deste novo método, para que, no futuro, seja possível desenvolver equações semelhantes as dos métodos já existentes e, resultados equivalentes ao possam ser obtidos, porém com as vantagens de: não se fazer uso de fontes radioativas, ser portátil e apresentar um custo relativamente baixo quando comparado aos outros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Análise Granulométrica

2.1.1 *Generalidades*

As partículas sedimentares apresentam elevada variabilidade em suas dimensões. Na natureza, encontram-se depósitos sedimentares constituídos por elementos de tamanhos variando de metros (como nas moreias glaciárias), até partículas extremamente pequenas, com diâmetros da ordem de alguns micra (como se verifica em determinados tipos de argilas) (Dias, 2004).

A análise granulométrica é de grande relevância pois proporciona a obtenção de informações importantes, entre outras, sobre a proveniência (designadamente sobre a disponibilidade de determinados tipos de partículas e suas origens), sobre o transporte (o conceito de maturidade textural e a resistência das partículas, segundo a sua composição, à abrasão e à alteração química), e sobre os ambientes deposicionais.

A análise consiste na determinação das dimensões das partículas que constituem uma dada amostra e no tratamento estatístico dessa informação. Basicamente, determina-se as dimensões das partículas individuais e estuda-se a sua distribuição, a qual pode ser feita por três formas: pelo peso de cada classe dimensional considerada, pelo volume ou pelo número de partículas integradas em cada classe. Assim, para se obter uma descrição adequada de um sedimento, faz-se necessário uma análise pormenorizada, utilizando classes granulométricas com pequena amplitude de tamanhos. Quanto menor a amplitude da classe, melhor é a descrição da variabilidade dimensional das partículas.

2.1.2 *Análise granulométrica de solos*

O termo hoje conhecido como análise granulométrica de solos, introduzido na literatura no primeiro ano do século XIX (KRUMBEIN, 1932) sob o nome de “análise mecânica de solos”, pode ser definido como a determinação das dimensões das partículas primárias de sua fase sólida, baseada nos diâmetros equivalentes destas partículas de determinada amostra e no tratamento estatístico dessa informação.

Uma das principais aplicações da análise granulométria do solo refere-se a obtenção das curvas de retenção de água, as quais fornecem informações importantes sobre a capacidade de armazenamento de água no solo em questão. A capacidade de armazenamento de água de um solo para o crescimento e desenvolvimento das plantas nele presente está diretamente relacionada a vários atributos físicos dos solos, dentre eles a curva de retenção de água ou curva característica potencial-umidade (TORMENA, SILVA e LIBARDI, 1998). Podem ser empregados vários métodos para a determinação desta curva, como o do funil de placa porosa, mesa de tensão ou câmaras de pressão (panela de Richards). Uma combinação de métodos é utilizada em campo, mas na maioria das vezes, determina-se o potencial da água (Ψ) por um tensiômetro conectado a um manômetro de mercúrio ou a um transdutor de pressão, enquanto técnicas como a moderação de nêutrons, reflectometria no domínio do tempo (TDR) e gravimetria são utilizadas para a determinação da umidade volumétrica (θ).

Em razão de dificuldades experimentais e ao longo tempo envolvido nessas determinações, tem-se observado um crescente interesse por métodos indiretos de estimativa da capacidade de retenção da água nos solos (BAVER; BAVAR, *et al.*, 1999), os quais utilizam dados taxonômicos simples. Dentre eles, o mais importante é o método da Função de Pedotransferência (PTF), o qual descreve equações que expressam dependências da retenção da água e condutividade hidráulica com parâmetros básicos disponíveis em levantamentos de solos, e o modelo de Arya e Paris (1981), o qual usa a similaridade entre as curvas de distribuição do tamanho de partículas e as curvas de retenção de água no solo.

As partículas menores que 2 mm são geralmente divididas em três frações: areia, silte e argila, porém diferentes sistemas de classificação têm definido diferentes limites para estas frações. No Brasil, adota-se a escala sugerida pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos-USDA, na qual a fração de areia tem diâmetro na faixa 2,00 - 0,05 mm, o silte de 0,05 – 0,002 mm e a argila < 0,002 mm (BAVER; GARDNER; GARDNER, 1972; TAN, 1996). É uma das escalas mais comuns em físicas de solo, freqüentemente utilizada na classificação textural de solos, curva de distribuição do tamanho das partículas, cujos dados servem de base para estimar propriedades hidráulicas do solo.

2.1.3 Métodos de Sedimentação

A maior parte dos sedimentos é heterogênea em relação à sua constituição granulométrica, apresentando partículas argilosas até areias grosseiras ou muito grosseiras ou, ainda, grânulos e seixos. Quando se trabalha com sedimentos de dimensões maiores, quase sempre é necessário combinar os métodos de análises. Assim, a necessidade levou a criação de diferentes métodos de análises granulométrica.

Atualmente, uma grande variedade de técnicas e cerca de 400 métodos de análise granulométrica de solos estão disponíveis na literatura (LOVELAND; WHALLEY, 2000). Uma ótima revisão dos primeiros trabalhos sobre análise granulométrica de solos, incluindo sua história, princípios e métodos, está apresentada em Krumbein (1932), e, mais recentemente, em Miller, Radcliffe e Miller (1988). Basicamente, os diferentes métodos incluem: peneiramento; peneiramento combinado com sedimentação e métodos de sedimentação.

As análises por peneiramento são utilizadas principalmente para a determinação das frações mais grossas de uma amostra como o pedregulho e as areias. Nela, as partículas são peneiradas após dispersão, com malhas quadradas de dimensões específicas, como a dada na Figura 1.



Figura 1 - Peneiras utilizadas em análise granulométrica.
Fonte: <<http://www.splabor.com.br>>

Por outro lado, nos métodos de sedimentação, o tamanho das partículas é determinado baseando-se no seu tempo de queda num determinado líquido específico, sendo os dois métodos de sedimentação mais utilizados o da pipeta e o do densímetro (ELLIOTT, *et al.*, 1999). Estes métodos consideram, como sugere a Lei de Stokes (STOKES, 1851), que as partículas são teoricamente esféricas e em regime de fluxo laminar (não turbulento), e se utilizam da Lei de Stokes para calcular a velocidade com que as partículas em suspensão sedimentam. A partir desta velocidade, é calculado o tempo necessário para que uma partícula do solo de determinado diâmetro seja sedimentada em determinado líquido específico. O material remanescente na solução pode ser quantificado de duas maneiras, por coleta de alíquotas (método da pipeta) ou a partir de sua densidade (método do hidrômetro) e, expresso em massa.

Um dos métodos mais tradicionais a usar a Lei de Stokes foi o de Casagrande (1934)¹. Porém, uma abordagem mais precisa usando essa teoria é o método da pipeta, publicado independentemente por Robinson (1922), Jennings, Thomas e Gardner (1922) e, Krauss (1923)² apud Krumbein (1932). Este método tornou-se padrão para análises de rotina em 1926, devido à recomendação do subcomitê da “Agricultural Education Association” da Grã-Bretanha, após a comparação de diversos métodos para análise granulométrica dos solos e, apesar da evolução tecnológica, que tem proporcionado o surgimento de novos equipamentos e métodos, o da pipeta ainda é mantido como referência na avaliação da precisão e exatidão de outros métodos.

O método da pipeta consiste em pipetar uma subamostra de um solo em suspensão aquosa mantida numa proveta de 1 litro, após o tempo t de sedimentação, a uma profundidade h da suspensão abaixo da qual todas as partículas com diâmetro d maior que X encontram-se sedimentadas. Segundo a Lei de Stokes, o tempo t (s), que determina o momento da coleta da fração argila, a uma determinada temperatura, é dado por:

¹ CASAGRANDE, A. **Die Aräometer-Methode zur Bestimmung der Kornverteilung von Böden und anderen Materialien.** Berlin: Julius Springer, 1934.

² KRAUSS, G. Ueber eine...neue methode der mechanischen bodenanalyse. **Mitt. Fur Bodenkunde**, v. 13, p.147-160,1923.

$$t = \frac{18 \eta_s h}{g (\rho_p - \rho_1) X^2} \quad (1)$$

Onde,

η_s = viscosidade da solução em função da temperatura (g cm s^{-1}),

h = profundidade de coleta (cm); ρ_p a densidade da partícula (g cm^{-3}),

ρ_1 = densidade da solução (g cm^{-3}),

g = aceleração da gravidade (cm s^{-2}),

X = diâmetro da partícula (cm).

A viscosidade (η_s) e a densidade (ρ_1) da solução em função da temperatura são calculadas pelas equações 2 e 3, respectivamente.

$$\eta_s = \eta_{\text{agua}} (1 + 4.25 C_s) \quad (2)$$

$$\rho_1 = \rho_{\text{agua}} (1 + 0.63 C_s) \quad (3)$$

Onde,

η_{agua} = viscosidade da água,

ρ_{agua} = densidade da água,

C_s = concentração do dispersante químico (g L^{-1}).

A fração argila, sifonada pela pipeta, é seca em estufa e pesada. A fração areia, separada por peneiramento ($< 53 \mu\text{m}$), logo após a dispersão, é obtida gravimetricamente. O percentual de silte é calculado então pela diferença: $100 - (\text{Areia} + \text{Argila}) \%$. Maior detalhamento pode ser encontrado em Gee e Or (2002). Uma desvantagem do método pipeta é requerer uma quantidade substancial de tempo e mão de obra para execução da análise. Assim, pesquisadores preferem utilizar o método do hidrômetro, mais rápido, principalmente quando se têm grande quantidade de amostras.

O método do hidrômetro, também conhecido como método de Bouyoucos, baseia-se no princípio da taxa de sedimentação ser proporcional ao tamanho da partícula de solo. Logo, as partículas de areia se sedimentam mais rapidamente que as de silte, e estas se sedimentam mais rápido que as de argila (ELLIOTT, *et al.*, 1999). Neste método, as percentagens de areia, silte e argila são obtidas a partir de duas leituras no hidrômetro, em $t_1 = 40\text{s}$ e $t_3 = 2\text{h}$. De acordo com Walter, Hallberg e Fenton (1978), ambos os métodos fornecem resultados comparáveis, desde que seguidos os procedimentos de pré-tratamento das amostras. O hidrômetro padrão é

o modelo n° 152H, recomendado pela “American Society for Testing Materials” (ASTM) e possui escala de Bouyoucos em g L^{-1} (Figura 2).

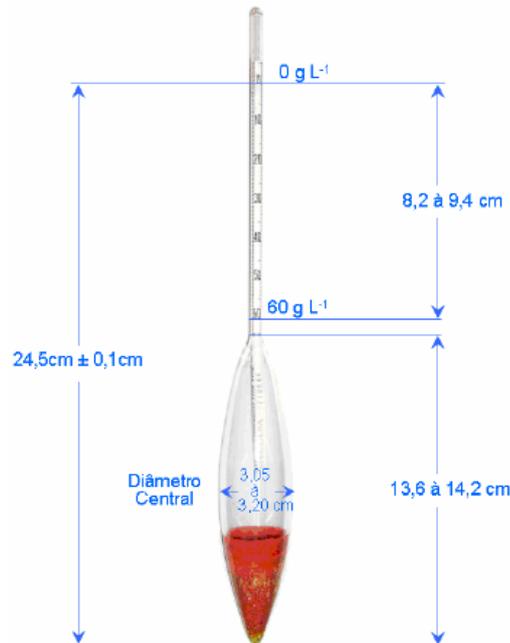


Figura 2 - Diagrama esquemático do hidrômetro da ASTM, modelo 152H.

Apesar de ainda muito utilizado em análises de rotina de várias universidades e institutos de pesquisa, esse método não é recomendado por alguns autores devido aos erros nas estimativas dos conteúdos de areia e argila (GEE; BAUDER, 1979; ASHWORTH et al., 2001). A validade deste método foi também questionada por Gee e Bauder (1986), que argumentaram sobre os tempos de sedimentação adotados empiricamente serem incompatíveis com as exigências da teoria de sedimentação. Os autores observaram que leituras feitas aos 40 s, subestimavam em 5 % a fração areia quando comparado ao percentual obtido gravimetricamente, após lavagem e pesagem da areia retida em peneira com abertura de $53 \mu\text{m}$. Também com relação a fração argila, determinada pela leitura de 2 h, o valor pode exceder em 10 % ou mais o valor real (MILLER, RADCLIFFE E MILLER, 1988).

Gee e Or (2002) propuseram um método mais completo do que o de Bouyoucos, utilizando o hidrômetro e baseado na metodologia sugerida por Day (1965). De acordo com os autores, este método permite medições não destrutivas da suspensão da solução do solo que contém as frações granulométricas em processo de sedimentação. Posteriormente, os autores ainda sugeriram adaptações desse método, que incluem redução das leituras, originando um método mais

simples e rápido. Apesar de reduzir o tempo de análise quando comparado com o da pipeta, o método do hidrômetro ainda não é suficientemente rápido para análises de rotina. Conseqüentemente, a redução do tempo de análise tem sido foco de várias pesquisas (GEE; OR, 2002; DAY, 1965).

Nas últimas décadas, o progresso tecnológico permitiu o desenvolvimento de novos métodos para análise granulométrica, tais como o método de difração a laser (COOPER; HAVERLAND; HENDRICKS, 1984; BUURMAN; PAPE; MUGGLER, 1997), método por atenuação de raios X (BUCHAN et al., 1993), por atenuação de raios gama (KARSTEN; KOTZE, 1984; NAIME et al., 2001), e espalhamento estático e dinâmico da luz (WU; BORKOVEC; STICHER, 1993).

O método por atenuação de raios gama, desenvolvido por Vaz et al. (1992), permitiu reduzir o tempo de análise para aproximadamente 20 minutos, uma vez que não exige secamento em estufa (24 horas) e dispensa pesagens, diferentemente dos métodos da pipeta e do densímetro de Bouyoucos (VAZ et al., 1992). Este método possibilitou o desenvolvimento de um equipamento automatizado por Naime et al. (2001) (Figura 3), o qual é capaz de analisar 10 amostras em 18 minutos cada (NAIME et al., 2001).

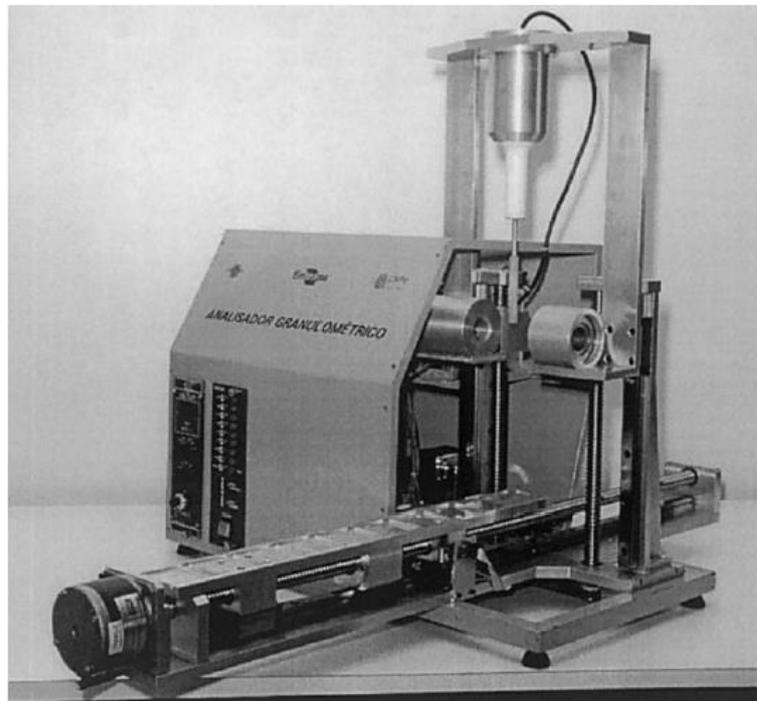


Figura 3 - Analisador granulométrico automatizado de solos.
Fonte: (NAIME et al., 2001)

Apesar da evolução tecnológica na área, esses métodos não se tornaram populares nos laboratórios de análises de solos, principalmente pelos custos envolvidos e o método da pipeta continua sendo utilizado como padrão para análises de rotina. A seleção dos métodos é feita de acordo com a equivalência de seus resultados com os obtidos pelo método da pipeta. Porém, devido a todos os métodos, sejam clássicos ou novos, estarem sujeitos a alguma forma de erro, não há um método considerado como padrão universal para análise granulométrica de solos. Assim, a escolha do método depende da avaliação das vantagens e desvantagens de cada um deles (ESHEL, *et al.*, 2004)

2.2 Interação da Luz com a Matéria

Radiações eletromagnéticas interagem com a matéria de muitas formas, e a luz, por ser uma onda eletromagnética, também o faz. Cada substância interage com a luz de forma diferente e, por meio desta interação, é possível identificar importantes características desta como a absorvância, transmitância e concentração da substância. Assim, ao atravessar uma solução contendo determinada concentração de soluto, a luz irá interagir com a matéria presente neste sistema de forma única, podendo acontecer três efeitos: absorção óptica pelas partículas, a transmissão de luz através da solução e o espalhamento de luz devido às partículas.

2.2.1 Fotometria

Quando mais cromóforo (substância que absorve luz) uma solução tiver, mais escura ela será. Assim, no início, a fotometria utilizou o olho humano para determinar a concentração de substâncias cromóforas. Com o tempo, usou-se cores ou concentrações padrões com as quais a solução em análise pudesse ser comparada. A falta de precisão destes métodos, devido a limitação e subjetividade da propriedade da visão, estimulou o desenvolvimento de métodos e equipamentos capazes de quantificar a luz e permitiu que a quantidade de fótons pudesse ser medida, permitindo uma quantificação muito mais precisa.

2.2.2 Transmitância e absorbância

Na óptica e espectroscopia, transmitância é a fração da luz incidente, com um comprimento de onda específico, que atravessa uma amostra de matéria (HECHT, 1990). Consiste na passagem inalterada da radiação através da matéria, ocasionada pela saturação desta energia.

Como exemplo, toma-se dois tubos de ensaios de mesmas dimensões, como na Figura 4, o primeiro com uma solução mais diluída e o segundo com a mesma solução, porém mais concentrada. Incidindo-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.

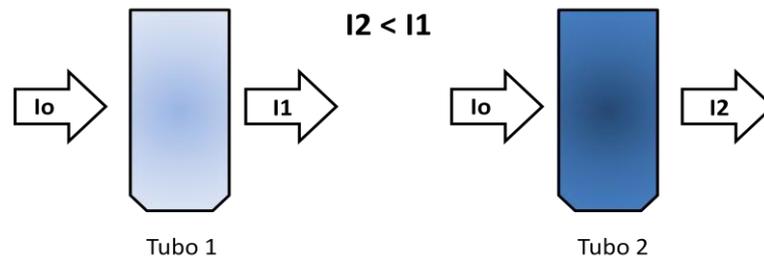


Figura 4 - Incidência da luz em 2 tubos de ensaios com diferentes concentrações.

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 .

A relação entre a luz de saída e luz incidente é conhecida com Transmitância (T) dada pela equação (4)

$$T_1 = \frac{I_1}{I_0} \text{ e } T_2 = \frac{I_2}{I_0} \therefore T_2 < T_1 \quad (4)$$

Outro conceito importante é o de Absorbância (A), que relaciona a quantidade de luz que é absorvida pelas moléculas da solução. A absorbância possui uma relação inversa com a transmitância, uma vez que quanto mais luz se absorve, menos luz se transmite. A equação (5) define a relação de absorbância:

$$A = -\ln(T) \quad \therefore \quad A = -\ln\left(\frac{I_t}{I_0}\right) \quad (5)$$

2.2.3 Reflexão e espalhamento

Embora a absorção seja o fenômeno mais significativo na interação luz-matéria, este não é o único efeito que pode ser observado. Parte da radiação incidente pode ainda ser refletida, em função do absorvedor ou das diferenças entre o índice de refração do meio onde a radiação se propaga e do meio que está sendo analisado (inclusive pelas paredes da cubeta), enquanto que outra parte poderá ser simplesmente espalhada, caso o meio não seja transparente e homogêneo. Conseqüentemente, a intensidade do feixe que é medida após a passagem pela amostra (intensidade transmitida, I_t) será menor que a intensidade inicial, I_0 .

Entretanto, um aspecto extremamente importante, é que todos estes efeitos associados à intensidade de radiação (Figura 5), estão relacionados entre si por uma expressão linear descrita pela equação (6):

$$I_0 = I_r + I_e + I_a + I_t \quad (6)$$

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.

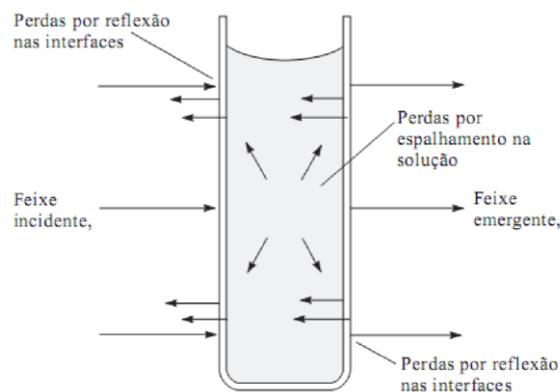


Figura 5 - Fenômenos ocorrentes na interação luz-matéria.
Fonte: adaptado de Skoog et al. (2003)

Em medidas convencionais, o efeito de reflexão da radiação eletromagnética, I_r , pode ser minimizado com o uso de medidas relativas e de cubetas com paredes homogêneas de pequena espessura e de faces paralelas. Assim, preparam-se duas cubetas, uma contendo a amostra que se deseja analisar e outra contendo todos os componentes da cubeta anterior, menos a substância de interesse. A medida da intensidade do feixe transmitido através da segunda cubeta servirá de referência para calibrar o instrumento, antes da medida da intensidade transmitida através da cubeta contendo o material de interesse. Este procedimento é empregado para se descontar os possíveis efeitos de reflexão observados no experimento. Pode-se, desta forma, perceber a necessidade do uso de cubetas praticamente idênticas, com paredes de pequena espessura e com faces paralelas (SKOOG, 2003).

2.2.4 A Lei de Beer-Lambert

Para que a diminuição na intensidade da radiação possa ser utilizada para se determinar a concentração de um cromóforo, é necessário relacionar estas duas grandezas, o que é feito pela lei de Lambert-Beer.

Quando um feixe de luz monocromática, atravessa um meio transparente homogêneo, cada camada deste meio absorve igual a fração de luz que atravessa, independentemente da intensidade da luz que incide. Em 1870, Lambert observou essa relação entre a transmissão de luz e a espessura da camada do meio absorvente e enunciou a seguinte lei: " *A intensidade da luz emitida decresce exponencialmente à medida que a espessura do meio absorvente aumenta aritmeticamente* ", expressa na equação 7.

$$I = I_0 \cdot 10^{-x \cdot b} \quad (7)$$

Onde,

I = Intensidade da luz transmitida,

I_0 = Intensidade da luz incidente,

x = constante denominada *coeficiente de absorção* e que depende do meio absorvente empregado,

b = Espessura do caminho óptico.

Beer (1852) observou a relação existente entre a transmissão e a concentração do meio onde passa o feixe de luz e a enunciou na seguinte lei: " *A intensidade de um feixe de luz monocromático decresce exponencialmente à medida que a concentração da substância absorvente aumenta aritmeticamente* ", ou seja, uma certa solução absorve a luz proporcionalmente à concentração molecular do soluto que nela encontra, também expressa na equação 8.

$$I = I_0 \cdot 10^{-k \cdot c} \quad (8)$$

Onde:

I = Intensidade da luz transmitida,

I_0 = Intensidade da luz incidente,

k = Constante denominada coeficiente de absorção,

c = Concentração do meio absorvente.

Simultaneamente, as leis de Lambert-Beer são o fundamento da espectrofotometria, e consideram que a quantidade de luz absorvida ou transmitida por uma determinada solução depende da concentração do soluto e da espessura da solução.

A lei de Beer-Lambert pode ser expressa matematicamente pela relação:

$$\frac{I}{I_0} = T = e^{-\varepsilon \cdot b \cdot c} \quad (9)$$

Onde:

T = Transmitância,

e = Logaritmo Natural de Euler,

ε = absortividade molar da substância em estudo,

b = Espessura do caminho óptico,

c = Concentração da solução (cor).

Aplicando-se logarítmo e utilizando a definição de absorvância acima citada, pode-se escrever:

$$A = \varepsilon \cdot b \cdot c \quad (10)$$

Onde a absorvância, uma grandeza adimensional, é diretamente proporcional à concentração da espécie de interesse na amostra e que absorve radiação em uma dada faixa de comprimento de onda. Geralmente, a concentração da amostra (c) é expressa em moles por litro, o caminho óptico (b) é expresso em centímetros (cm), e a absorvidade molar expressa em mol L⁻¹ cm⁻¹ (SKOOG, 2003).

2.3 A Lei de Stokes

Um dos princípios fundamentais em que se baseia a análise granulométrica é o de que pequenas partículas, decantando em água ou outros fluidos, sob um campo uniforme de forças, caem com velocidades constantes. Na queda, a partícula fica sujeita a uma força resistiva, de magnitude dependente do regime fluidodinâmico vigente, e de aspectos morfológicos dessa partícula. Quando o equilíbrio entre a força gravitacional e a força de resistência do fluido é alcançado, a partícula atinge uma velocidade constante terminal de sedimentação.

Stokes (1851), estudando as velocidades de queda de esferas dentro de cilindros com líquidos de diferentes viscosidades, chegou a fórmula empírica, que dá o valor da resistência que um fluido oferece à movimentação em seu meio, dada na equação 11:

$$R = 6\pi \cdot r \cdot n \cdot v \quad (11)$$

Onde,

R = resistência à queda em $g \cdot cm/s^2$;

r = raio da esfera em cm;

n = viscosidade do fluido em dinas;

v = velocidade de queda em $cm \cdot s^{-1}$.

A força da gravidade, de cima para baixo, que provoca a queda da partícula pode ser expressa por

$$F = M \cdot g \quad (12)$$

Onde

F = força,

M = massa da esfera,

g = aceleração da gravidade ($980 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$).

A massa da esfera pode ser obtida multiplicando-se seu volume pela sua densidade d_1 .

Um corpo em queda em meio fluido recebe, de baixo para cima, a ação de uma força chamada “força de empuxo”, cujo valor é dado pela fórmula (princípio de Arquimedes):

$$I = \frac{4}{3\pi} \cdot r^3 \cdot d_2 \cdot g \quad (13)$$

Onde,

I = empuxo,

d_2 = densidade do fluido.

A força resultante será dirigida de cima para baixo e igual a

$$S = \frac{4}{3\pi} \cdot r^3 \cdot g \cdot (d_1 - d_2) \quad (14)$$

Quando o valor de $S(14)$ torna-se igual ao de $R(11)$, a velocidade de queda se tornará constante e, portanto,

$$6\pi \cdot r \cdot n \cdot v = \frac{4}{3\pi} \cdot r^3 \cdot g \cdot (d_1 - d_2) \quad (15)$$

Desta relação pode-se obter o valor da velocidade v , de queda de partículas em meio fluido,

$$v = \frac{2 \cdot g \cdot r^2 \cdot (d_1 - d_2)}{9n} \quad (16)$$

Quando condições padrões são consideradas, isto é, temperatura constante, determinado tipo de fluido e partícula esférica de densidade conhecida, a fórmula de Stokes pode ser expressa por

$$v = C \cdot r^2 \quad (17)$$

Onde

$$C = \frac{2(d_1 - d_2)g}{9\eta} \quad (18)$$

Tabelas para o valor da constante C sob várias condições têm sido computadas. Entretanto, a lei de Stokes é perfeita somente em certas condições ideais (de acordo com o resumo de Köster, 1960 – in Müller, 1967), as quais são:

- 1) As “partículas” do fluido devem ser muito pequenas em relação às partículas em queda. Esta condição é satisfeita quando os corpos em queda são de 10^4 a 10^7 vezes maiores que as moléculas do fluido.
- 2) O fluido deve ter extensão “infinita” em relação as partículas em queda. Esta condição é satisfeita quando o diâmetro do cilindro de sedimentação é de no mínimo 5 cm.
- 3) As partículas sólidas em queda devem ser lisas e rígidas. A condição de rigidez é geralmente satisfeita, mas as partículas nem sempre são lisas.
- 4) Não deve haver atrito entre o fluido e a partícula. Em geral isto não ocorre nos fluidos utilizados.
- 5) A velocidade de queda deve ser baixa.

2.4 LED como fonte de emissão

Os diodos emissores de luz – LED (Light Emitting Diode) (Figura 6), são dispositivos de baixo custo que emitem radiação nas regiões do espectro UV, visível e do infravermelho próximo. Disponibilizado no mercado a partir de 1960, sua utilização como fonte de radiação eletromagnética em fotometria foi proposta apenas em 1978 por Betteridge, et al.



Figura 6 - LEDs Comerciais.
 Fonte: <<http://www.greenprophet.com>>

O LED é um diodo semicondutor (junção P-N), que emite radiação eletromagnética devido a um fenômeno chamado eletroluminescência, que é a emissão gerada por excitação eletrônica, pela passagem de uma corrente elétrica através do material. São empregados em maior escala em fotometria os que emitem na região visível (400 – 700 nm) do espectro eletromagnético (Figura 7).

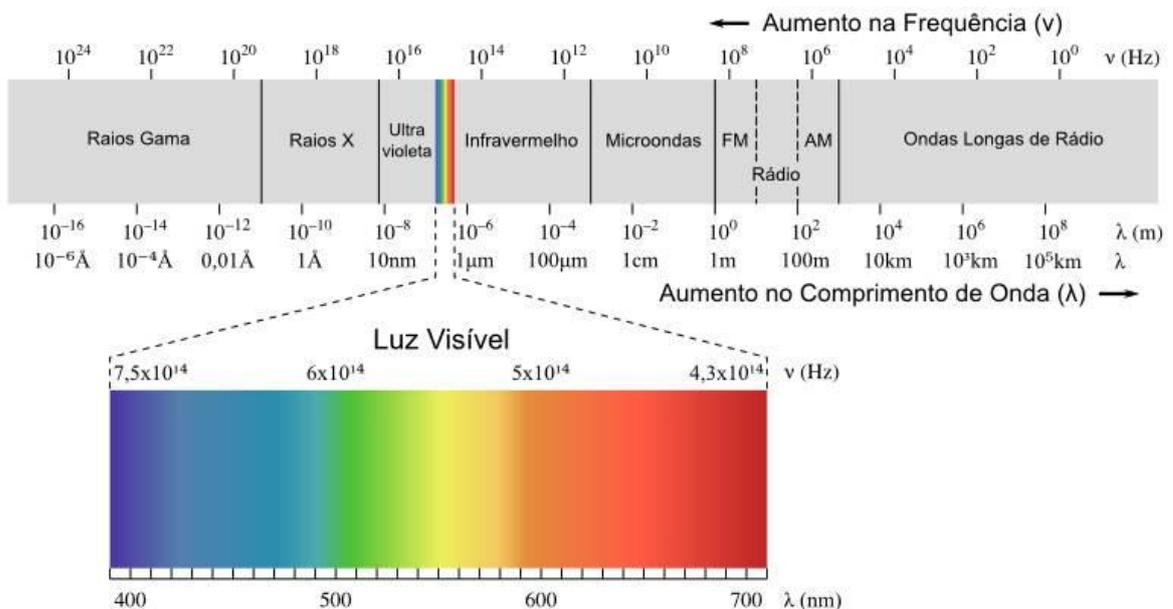


Figura 7 – Espectro Eletromagnético de frequências.
 Fonte: <<http://coresnconceicao.blogspot.com.br>>

A radiação emitida não é monocromática (como por exemplo, laser), mas composta por uma banda espectral considerada estreita ($\Delta\lambda \approx 30 \text{ nm}$), com ótima estabilidade em comprimento de onda e intensidade do feixe de radiação (DASGUPTA, et al., 1993). Na Tabela 1 são apresentados os LEDs mais utilizados em instrumentação analítica e suas respectivas características de emissão.

Tabela 1 - Características de LEDs encontrados comercialmente (DASGUPTA et. al., 1993)

LED	Composição	λ_{max} (nm)	Faixa de intensidade (nm)
Azul	GaN	435,482	418-510
Verde	GaP	565	548-576
Amarelo	GaAsP/GaP	583	565-601
Vermelho	GaAsP	655	643-667
Infravermelho	GaAs	940	929-978

A mistura de todas as ondas do espectro visível produz na vista humana a percepção do branco. Quem primeiro fez esta demonstração foi o cientista inglês, Isaac Newton, em 1666, que utilizando um prisma 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 8.

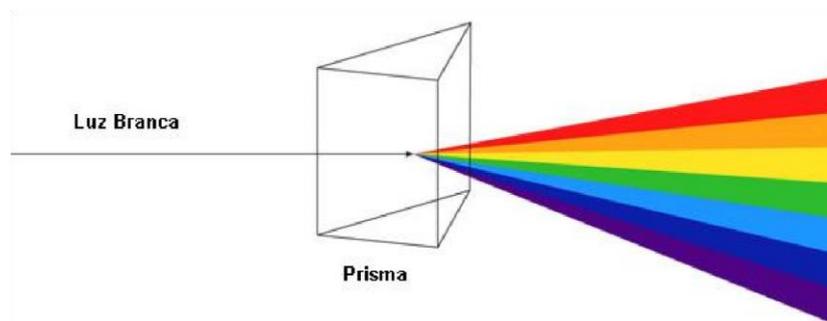


Figura 8 - Decomposição da luz branca.
Fonte: <www.proyectacolor.cl>

Fotodiodos ou fototransistores são geralmente empregados como detectores da radiação emitida pelos LEDs. Devido ao menor tempo de resposta e maior faixa linear para a radiação incidente, os fotodiodos (Figura 9) são mais utilizados em

detecção fotométrica e foram escolhidos para o presente trabalho (TROJANOWICZ, WORSFOLD e CLINCH, 1988).



Figura 9 - Fotodiodo Comercial.
Fonte: <<http://www.tmgeletronica.com.br>>

3 MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho, desenvolvido nas dependências da Embrapa Instrumentação, propõe um novo método de análise granulométrica, a partir de um sistema multi-amostral utilizando LEDs como fonte de emissão não radiativa e analisa a viabilidade técnica do mesmo a partir da comparação dos dados adquiridos pelo hardware desenvolvido com curvas teóricas.

A Figura 10 traz o diagrama de blocos da proposta de trabalho deste projeto.

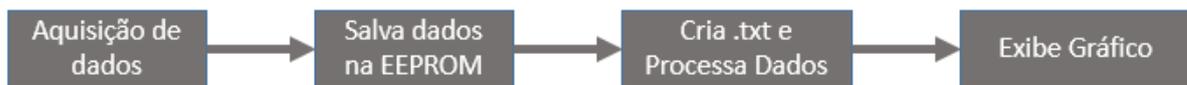


Figura 10 - Diagrama de blocos do projeto.

O equipamento é formado por quatro torres (ver Figura 13), que podem ser acionadas através de um software de interface no computador, que se comunica via serial com o microcontrolador PIC referente a torre desejada.

O PIC da torre selecionada acende um conjunto de LEDs, mantendo-os assim durante as leituras dos sinais dos fotodetectores. Esta leitura é multiplexada e decodificada conforme endereçamento realizado pelo PIC. Os sinais passam então ao conversor A/D do PIC, que em seguida é gravado em uma memória EEPROM única para cada torre.

No final da aquisição, o usuário deve requisitar os dados para o PIC desta torre. Com isso, o PIC descarrega os dados gravados em memória para o computador, que apresenta estes dados em forma gráfica.

O presente trabalho baseia-se no mesmo princípio do método por atenuação de raios gama, o qual durante o processo de sedimentação das partículas dispersas em água, utiliza o princípio da atenuação para calcular a concentração em diferentes alturas da amostra, através de uma modificação na Lei de Lambert-Beer e a Lei de Stokes para determinar a distribuição do tamanho de partículas.

3.1 Projeto e implementação do hardware

Para se atingir os objetivos propostos neste trabalho, fez-se necessário o projeto e a implementação de um hardware específico para o acionamento dos LEDs e aquisição dos sinais capturados pelos fotodiodos, bem como um circuito de comunicação das quatro torres com o computador, baseados em um sistema já existente na Embrapa Instrumentação. Os circuitos completos estão apresentados no Anexo I.

3.1.1 Disposição e controle dos LEDs

Para se conseguir uma maior intensidade de luz, o LED utilizado foi o comercial Branco 3mm de alto brilho, o qual é mostrado na Figura 11 e possui como características:

- Diodo emissor de luz branco de 3mm;
- Tensão de alimentação de 3V a 5V;
- Corrente de consumo de 20 a 50 mA.



Figura 11 - LED Branco 3mm.
Fonte: < <http://www.lojadaspecas.com>>

A intensidade relativa em função do comprimento de onda é dado na Figura 12 - *Intensidade Relativa vs. Comprimento de onda do LED branco.*

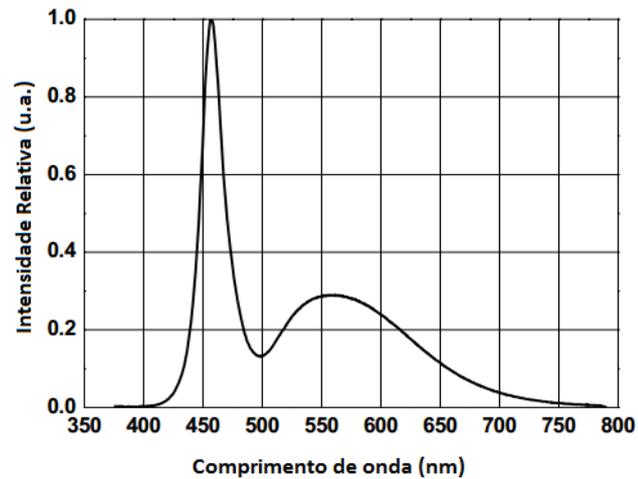


Figura 12 - Intensidade Relativa vs. Comprimento de onda do LED branco
Fonte: < <http://www.lojadaspecas.com> >

A disposição do sistema LEDs-Fotodiodos foi realizada de modo que os LEDs fossem sobrepostos ao longo do comprimento da cubeta e que a cada LED correspondesse um fotodiodo, alinhado simetricamente em relação ao centro da torre, como mostrado na Figura 13.



Figura 13 - Torre de um Sistema de Aquisição.

Para o controle do acionamento dos LEDs, foi desenvolvido um circuito de driver, acionado pelo pino 3 do PIC da torre, conectado aos LEDs como mostra a Figura 14.

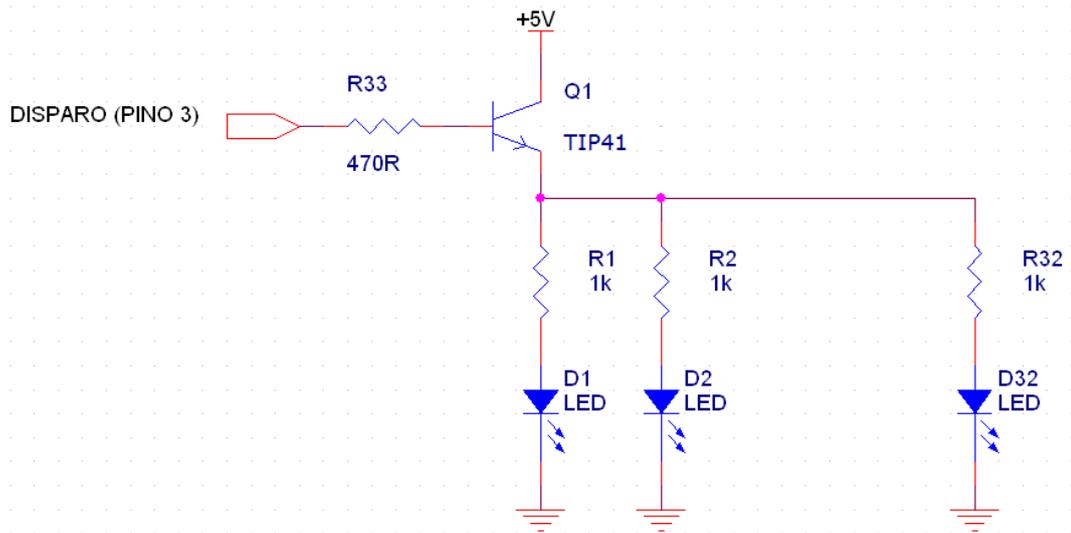


Figura 14 - Controle dos LEDs.

3.1.2 Sistemas de Aquisição

Enquanto os LEDs de uma torre permanecem ligados, é feita a aquisição do sinal dos Fotodiodos, os quais são controlados por um circuito de chaveamento, que envia o sinal, em tensão, de cada fotodiodo para o conversor AD do PIC, onde este é convertido de analógico para digital e adaptado para uma escala de 0 a 1024.

A Figura 15 representa o esquema do circuito de chaveamento de cada fotodiodo (FD_x) pelos dois demultiplexadores (D_x).

D0-D15 (1)

D0-D15 (2)

FD1-FD32

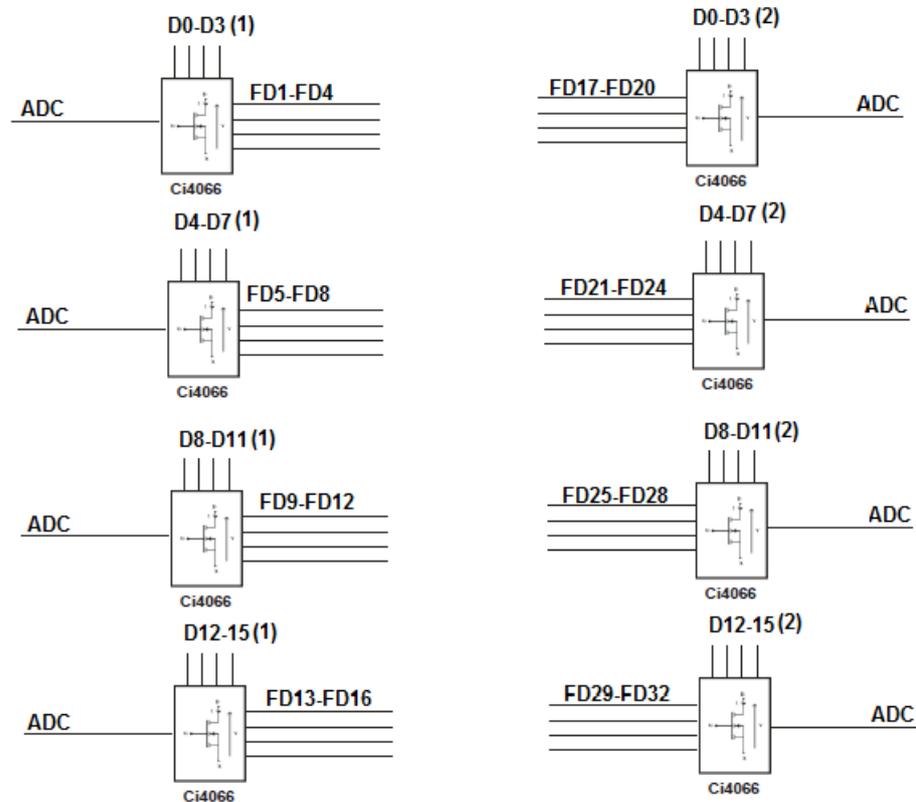


Figura 15 - Circuito de Chaveamento dos Fotodiodos.

O chaveamento é realizado utilizando-se CI4066. O CI4066 é um circuito integrado produzido sob tecnologia CMOS, composto por 4 chaves independentes para a transmissão ou multiplexação de sinais analógicos ou digitais. Cada chave é controlada por um sinal independente, que proporciona a mudança de estados ligado/desligado.

O CI4066 utilizado é apresentado na Figura 16 e possui as seguintes características:

- Resistência típica de estado ligado, "on", de 125Ω constante para uma tensão de alimentação típica de 15V
- Resistência de estado desligado, "off", de $10^{12}\Omega$
- Intervalo das tensões de alimentação: $-0,5 < V_{DD} < +20$ [V], $-0,5 < V_{SS} < +20$ [V]
- Temperatura de operação (T_A): -55 até +125 [°C]

- Baixa corrente de chaveamento I_b
- Resposta rápida devido aos transistores MOSFET

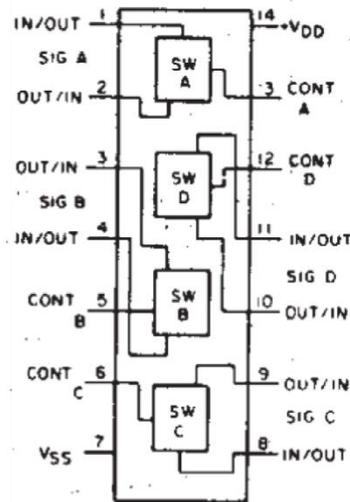


Figura 16 - Detalhamento do CI4066.

Fonte: < <http://www.alldatasheets.com/CI4066.html> >

O controle de cada uma das quatro chaves é feito pelos pinos $CONT_x$, onde x representa a chave A, B, C ou D. Se $CONT_x = V_{DD}$, a chave SW_x se fecha, permitindo a passagem do sinal x . Se $CONT_x = V_{SS}$, a chave SW_x se abre, impedindo a passagem do sinal x . No projeto apresentado, as tensões escolhidas foram de $V_{DD} = 5V$ e $V_{SS} = 0V$.

Devido ao número de fotodiodos de cada torre ser 32, e como cada CI4066 possui 4 chaves, este circuito é composto por 8 circuito de chaves 4066, cada um responsável pelo chaveamento de 4 fotodiodos, e também 2 circuitos demultiplexadores.

O circuito demultiplexador utilizado no projeto é o CD4514, ele apresenta quatro entrada de dados (A0-A3), 16 saídas (Y0-Y15) e uma entrada de controle (\bar{E}) e um esquema é mostrado na Figura 17. O acionamento da saída desejada é feito aplicando-se o endereçamento nas entradas (A0-A3) e nível lógico baixo no pino de controle (\bar{E}).

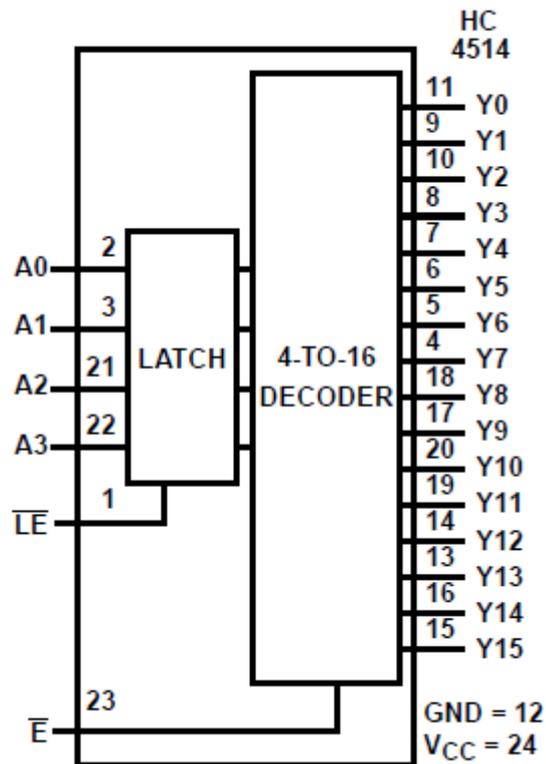


Figura 17 - Detalhamento do circuito Demultiplexador.

Fonte: < www.datasheetarchive.com/3--CD54HC4514F-datasheet.html >

Para que o sinal de cada fotodiodo seja capturado individualmente, este deve ser obtido através do fechamento da chave correspondente, pelo endereçamento e habilitação do CD4514 ligado ao sinal de controle desta chave. Com este fechamento, o sinal de cada fotodiodo é condicionado pelo ajuste de um trimpot, e depois transmitido ao conversor AD do PIC. O circuito de condicionamento é mostrado na Figura 18.

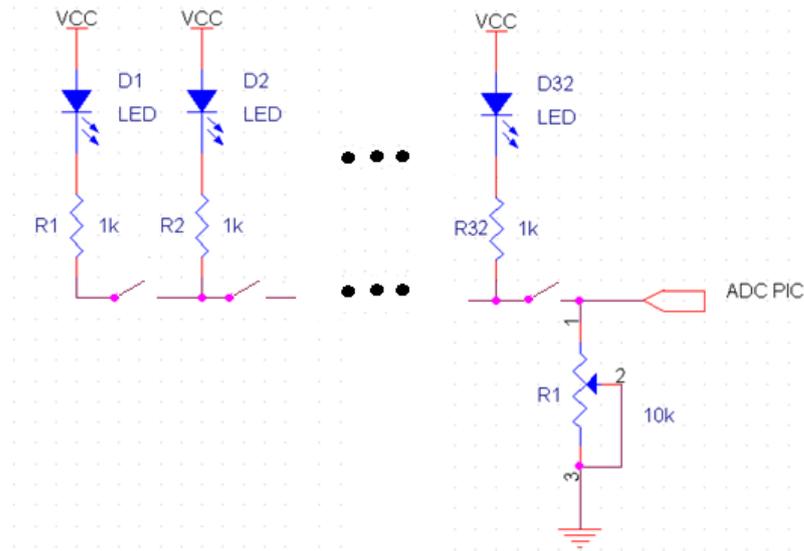


Figura 18 - Circuito de Condicionamento do Sinal dos Fotodiodos.

O trimpot, do inglês trimmer potentiometer, é um resistor ajustável, usado para conseguir um valor específico de resistência que não seria facilmente conseguido utilizando-se apenas resistores. Neste projeto, o valor para o trimpot foi ajustado de forma que, quando na ausência de qualquer tipo de impedimento da passagem de luz entre LEDs e fotodiodos, o valor obtido pelos fotodiodos fornecesse a maior amplitude de valores para as futuras leituras. Todos os valores adquiridos foram convertidos para uma escala numérica de 10 bits, ou seja, variando de 0 à 1024.

3.1.3 Comunicação entre PIC e Computador

O microcontrolador escolhido para o projeto é o PIC16F876A, da Microchip, cuja pinagem é mostrada na Figura 19. Este foi escolhido devido a:

- Velocidade de processamento não ser um fator crítico no projeto;
- Necessidade de armazenamento elevada de dados e a utilização de uma memória EEPROM externa para o projeto;
- Fator preço dos componentes.

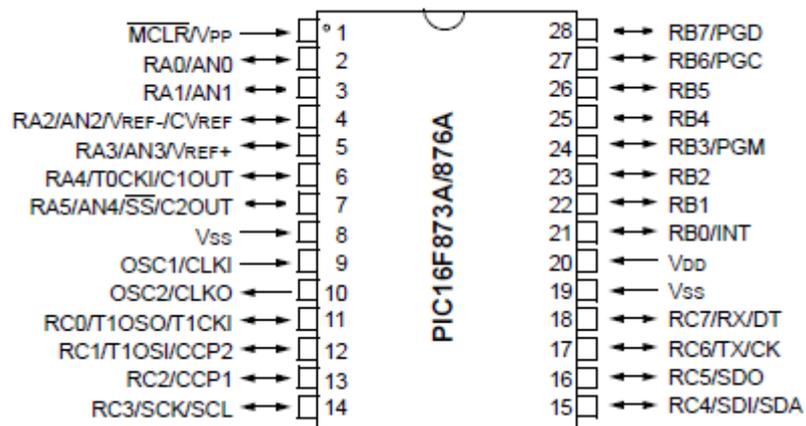


Figura 19 - Pinagem do PIC 16F876A.

Fonte: < www.datasheetarchive.com/PIC16F876A-datasheet.html>

A Tabela 2 apresenta algumas características do microcontrolador PIC16F876A e o apêndice A apresenta a relação entre as portas do microcontrolador.

Tabela 2 - Características do PIC 16F876A

CARACTERÍSTICAS	PIC 16F876A
Frequência de Operação	DC - 20 MHz
Resets (e Delays)	POR, BOR (PWRT, OST)
Memória de programa Flash	8k
Memória de Dados	368
Memória de Dados EEPROM	256
Interrupções	14
Portas I/O	Portas A, B e C
Timers	3
Comunicação Serial	MSSP, USART
Módulo Analógico-Digital de 10 bits	5 canais
Comparadores Analógicos	2
Set de Instruções	35

A comunicação entre o PIC e o computador é feita através da Porta Serial, com o circuito integrado MAX232, o qual é um conversor de sinal responsável por converter o padrão RS232 em sinal TTL e o sinal TTL em RS232.

O padrão de comunicação RS232 está apresentado na Figura 20. Pacotes transmitidos no padrão RS232 são de formato fixo e possuem 10 ou 11 bits. O estado de repouso de uma linha serial consiste em um valor lógico fixo '1'. A transmissão se inicia com o STARTBIT, que é uma transição deste estado de repouso para um valor lógico '0'. O STARTBIT é seguido de 8 bits, enviados a partir do menos significativo e constituem a parte de dados do pacote. O décimo bit enviado numa comunicação serial pode ser o bit de PARIDADE. Este bit é opcional e pode-se empregar paridade par ou paridade ímpar. Por último, é enviado o STOPBIT, que indica o fim da transmissão, dado pelo valor lógico '1' com duração de 1, 1.5 ou 2 bits. Após o STOPBIT, a linha permanece em repouso ou transmissão de um novo pacote pode ser iniciada.

Todos os bits, com exceção do STOPBIT, possuem tempo de duração idêntico. A taxa de transmissão, também chamada de *baud rate*, é dada pelo inverso do tempo de transmissão de um bit em segundos e é dada em bits por segundo (IDE et. al., 2003).

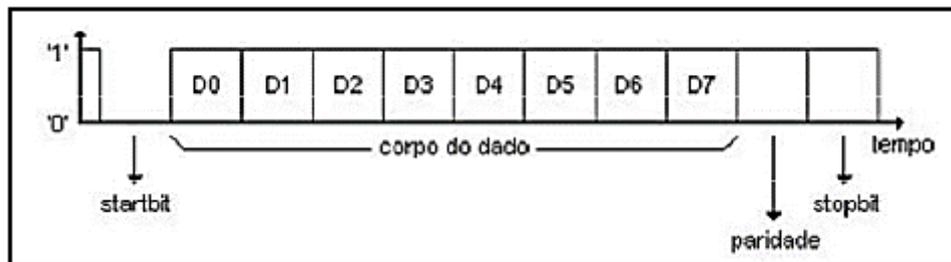


Figura 20 - Protocolo Comunicação Serial.
Fonte: (IDE et. al., 2003)

Para se realizar a comunicação das quatro torres com o computador, com o objetivo de se evitar conflitos no duto de comunicação, fez-se necessário a implementação de um circuito especial para comunicação, dado na Figura 21.

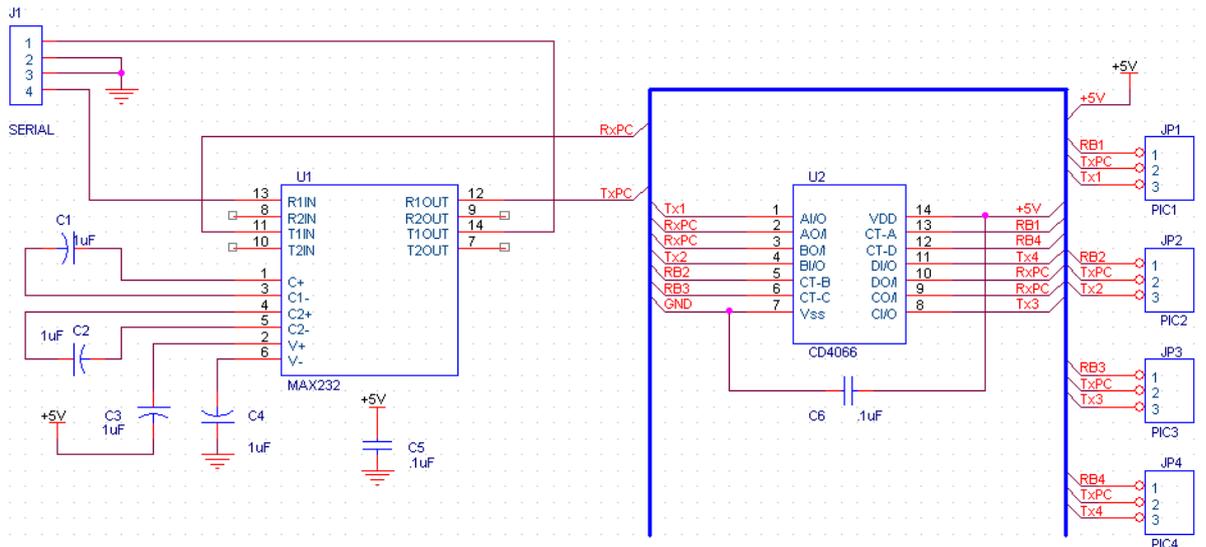


Figura 21 - Circuito de Comunicação.

Nele, a MAX232 é conectada à Porta Serial do computador e também à um CI4066 que realiza o chaveamento e a seleção de uma das 4 torres. O circuito de seleção tem como entradas os pinos de entrada/saída de dados (TX e RX) de cada um dos 4 PICs referentes as torres, bem como um pino de controle vindo de cada um dos PICs e como saída o pino de entrada de dados (RX) da Porta Serial do computador.

O pino de saída de dados do computador (TX) é ligado diretamente ao PIC de cada torre. Cada PIC é acionado individualmente pelo envio de um bit de seleção ao início da comunicação, representado pelos caracteres “W”, “X”, “Y” ou “Z”, para as torres 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Assim, quando determinado comando é enviado pelo computador aos PICs, somente um dos PICs irá responder aos comandos, ativando o bit de controle no CI4066 referente ao mesmo no circuito de comunicação.

3.1.4 Conversor Analógico Digital

O PIC16F876A contém um conversor analógico-digital de 2 canais de 10 bits, controlado por software, onde as entradas são os pinos AN0 e AN1.

No projeto, um fotodiodo é lido por vez, logo, é necessária a utilização de apenas uma entrada, AN0, para fazer a conversão dos sinais analógicos dos fotodiodos para digital.

3.1.5 Alimentação dos Dispositivos

Para gerar as tensões necessárias de fornecimento de energia para todo o equipamento é utilizada uma fonte de tensão de corrente contínua (Minipa MPC-303DI) de +12V. Para circuitos integrados que funcionam com tensões menores, foram desenvolvidos circuitos reguladores de tensão conforme mostrado na Figura 22, utilizando o dispositivo LM350, que é um regulador de tensão de alta capacidade de corrente e foi utilizado para abaixar as tensões do circuito para 5V com precisão.

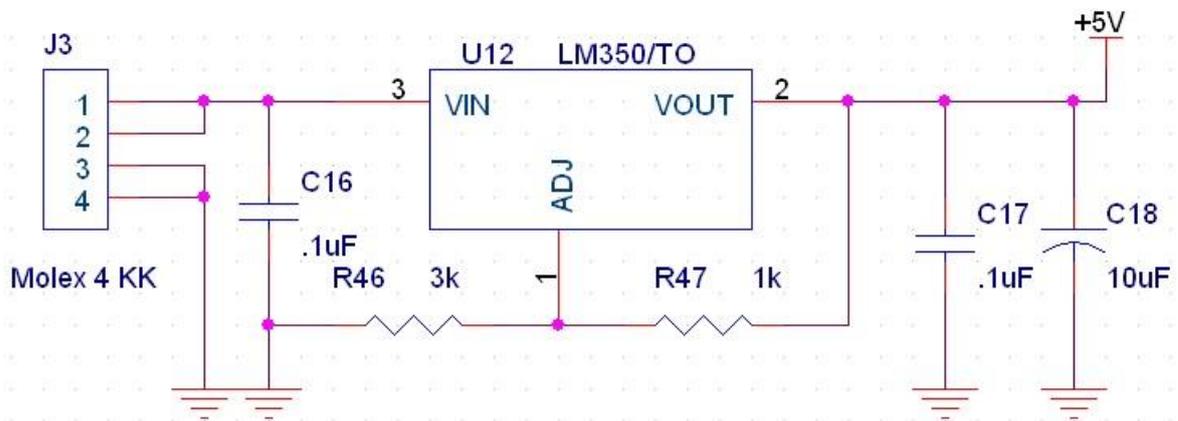


Figura 22 - Circuito Regulador de Tensão.

3.1.6 Firmware

O firmware elaborado para o microcontrolador foi implementado no software MPLAB, em linguagem de programação ASSEMBLY, e o fluxograma do programa gravado no microcontrolador é dado na Figura 23.

O programa foi desenvolvido com base em interrupções globais. Desta forma, a rotina principal possui uma quantidade mínima de instruções a realizar, e a maior parte do código é executado apenas por solicitação de interrupções do hardware externo ao microcontrolador.

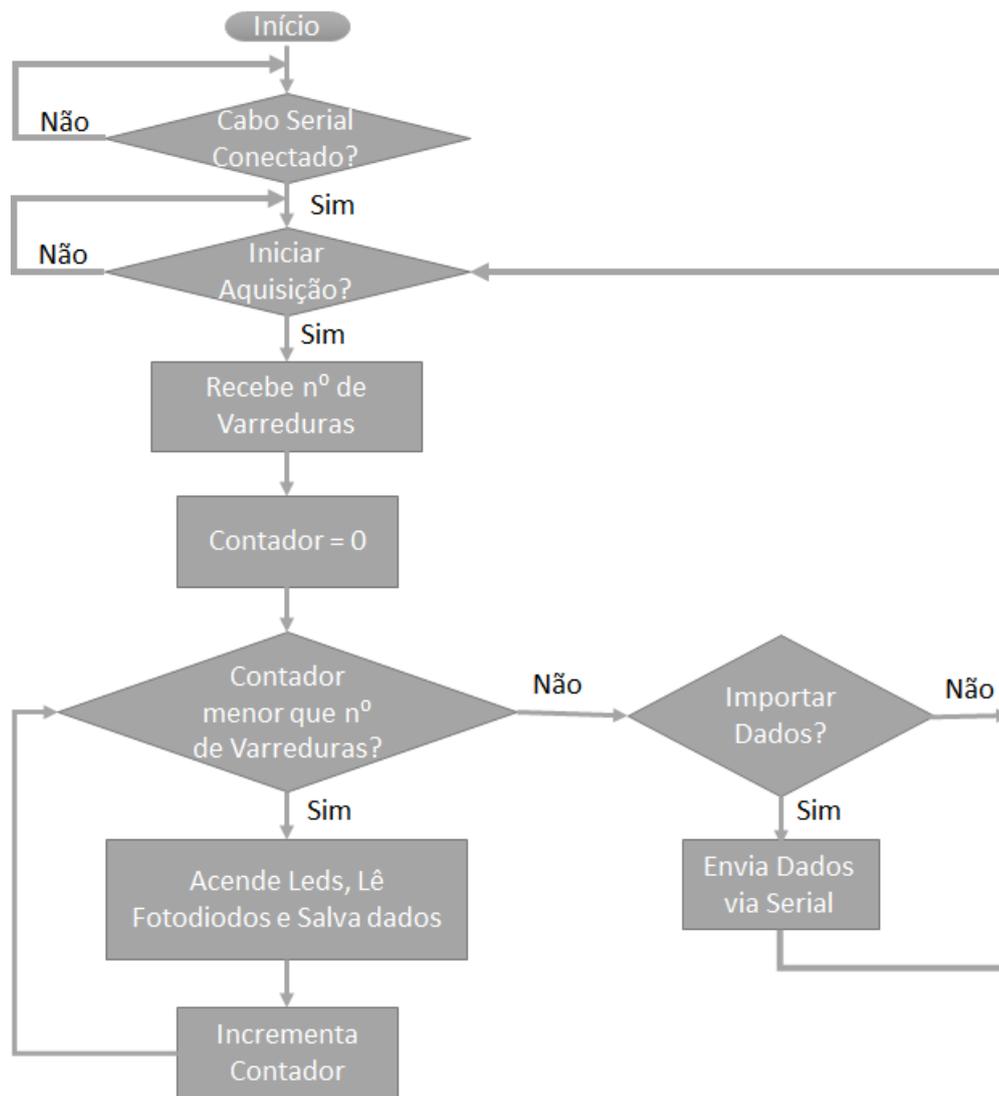


Figura 23 - Fluxograma do Firmware gravado no microcontrolador.

3.2 Software de Aquisição

Para a interface do usuário com os sistemas de aquisição, foi desenvolvido um programa em linguagem Java, no software NetBeans IDE e que pode ser visto na Figura 24.



Figura 24 - Tela de Interface do usuário.

Assim, quando o usuário deseja iniciar uma aquisição, ele primeiramente deve selecionar a porta COM serial na qual o equipamento encontra-se ligado ao computador, e esperar pela mensagem de confirmação de conexão.

Uma vez que a conexão foi estabelecida, o usuário deve escolher um dos sistemas, referente a torre que se deseja utilizar, observando qual está livre no momento, através do ícone de sinalização de uso em cada uma das janelas (Disponível). Após a escolha do sistema, o usuário informa na janela do sistema de aquisição a ser utilizado o número de varreduras desejado, sendo este menor do que 256 e o intervalo entre as varreduras, sendo este maior do que 3 segundos, que é o tempo de varredura padrão dos 32 LEDs. Durante cada varredura, o sistema irá obter as tensões instantâneas de saída dos 32 fotodiodos, e convertê-las para a escala 0-1024, processo o qual é repetido para o número total de varreduras. Deve-se então colocar a cubeta com a mistura com a amostra de solo e água na torre do sistema a ser utilizado e clicar em Iniciar Aquisição. Assim, o programa solicita o início da aquisição dos dados ao microcontrolador do sistema.

O sistema de aquisição selecionado irá então, enquanto as partículas da amostra sedimentam, realizar o número de varreduras solicitadas, no tempo total de aquisição, dado na equação (16), e irá indicar em seu ícone de status que encontra-se ocupado.

$$\text{Tempo} = N^{\circ} \text{ de varreduras} * \text{Intervalo entre varreduras} \quad (16)$$

Transcorrido o tempo total, a janela referente ao sistema irá sinalizar com um ícone azul que os dados estão prontos para serem importados, e o usuário pode solicitar a importação dos dados. O software irá então importar os dados, salvos em memória, para o computador, criar um arquivo .txt com o nome dado e exibir os dados de cada fotodiodo em forma gráfica em um conjunto de tabs (uma tab para cada sistema de aquisição, como mostra a Figura 25), com o número de varreduras no eixo x, e a Intensidade recebida no eixo y.



Figura 25 - Tela gráfica do software de interface.

Devido a independência de cada sistema, enquanto um dos sistemas está trabalhando, outro, ou todos também pode(m) ser acionado(s), seguindo o mesmo procedimento de fornecer o número de varreduras e o intervalo entre elas e iniciando a aquisição dos mesmos. Eles trabalharão independentemente e, ao término de cada sistema, poderá ser requisitada a importação de dados referente à este e o software irá mostrar o gráfico de cada um dos sistemas em sua respectiva tab gráfica.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para análise dos resultados foram feitas três amostragens, uma com leite de magnésia, que apresenta uma alta velocidade de sedimentação, e duas com dois tipos de solos, de diferentes conteúdos texturais. Com isso, obteve-se três arquivos .txt com os dados de cada amostra, a partir dos quais foi possível plotar os gráficos utilizando o software de aquisição.

Inicialmente, como já foi mencionado, deve-se calibrar o instrumento com o intuito de se minimizar os possíveis efeitos de reflexão da radiação eletromagnética. Para isso, preencheu-se com água destilada a mesma cubeta utilizada para as três amostras e fez-se uma medida de calibração.

Os resultados obtidos para os 32 LEDs do sistema 1 estão dispostos na Tabela 3, e podem ser vistos em forma gráfica na Figura 26, onde tem-se no eixo X o número de varreduras e no eixo Y a intensidade dos fotodiodos, convertida para a escala de 0 a 1024.

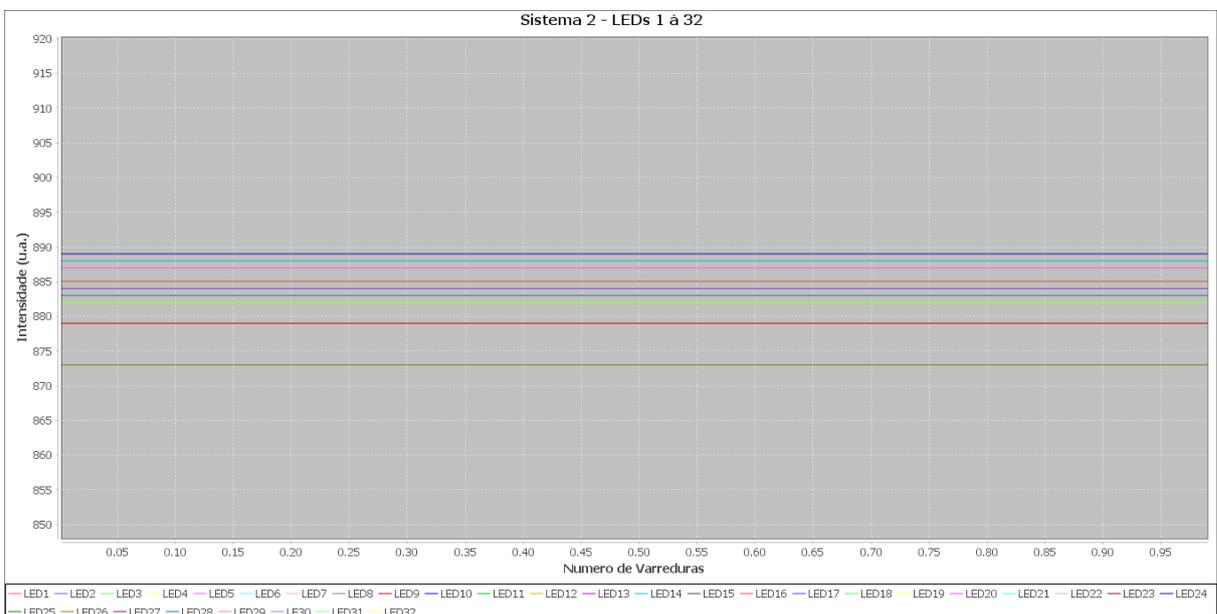


Figura 26 - Calibração do Sistema.

Tabela 3 - Intensidade Padrão dos LEDs

LED	INTENSIDADE
1	885
2	884
3	882
4	885
5	887
6	885
7	885
8	883
9	879
10	889
11	885
12	885
13	885
14	888
15	885
16	885
17	885
18	885
19	882
20	885
21	883
22	885
23	885
24	885
25	885
26	873
27	883
28	885
29	884
30	885
31	883
32	885

Observa-se que as intensidades dos LEDs são bem próximas entre si, apresentando um valor médio de 884 e desvio padrão de 2.65. Esses valores foram utilizados para a normalização dos resultados obtidos para as três amostras realizadas.

Na primeira amostra foi utilizado a mistura homogênea de hidróxido de magnésio, $Mg(OH)_2$, popularmente conhecida como Leite de Magnésia, e água destilada. A razão pela qual esta substância foi utilizada foi pela sua velocidade de sedimentação elevada e disponibilidade em laboratório.

Para a análise, o tempo total foi estipulado tal que quase a totalidade das partículas já houvessem sedimentado. Assim, na primeira amostra, o software foi programado para realizar 200 varreduras, com intervalo de 5 segundos entre cada varredura, totalizando um período de aproximadamente 17 minutos para a amostra.

As curvas obtidas são apresentadas na Figura 27.

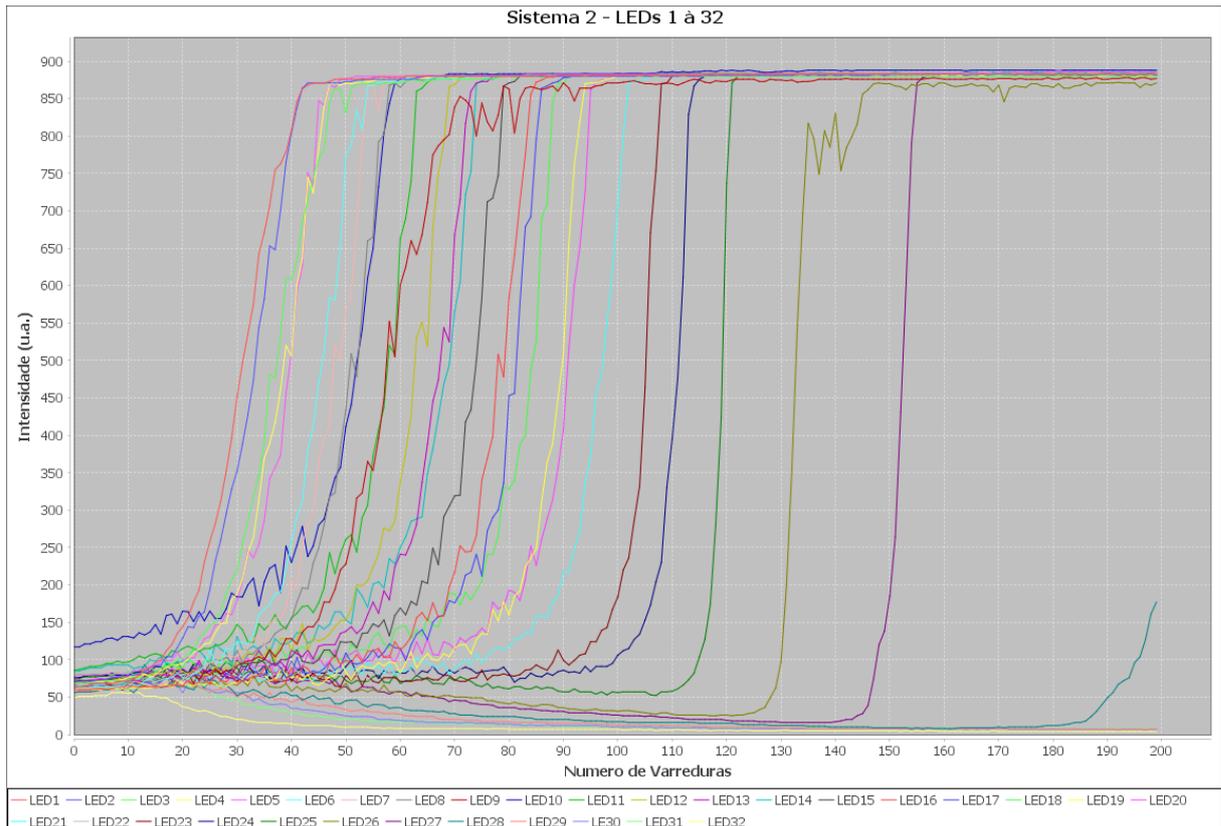


Figura 27 - Curva da Sedimentação do Leite de Magnésia.

Os solos para as amostras dois e três foram coletados na Fazenda Canchim - Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos, SP. Na segunda amostra foi utilizada uma mistura de água destilada e solo TRE (Terra Roxa Estruturada Eutrófica), de textura mais arenosa, apresentando partículas maiores e, portanto, maior densidade. O software foi programado para realizar 200 varreduras, com intervalo de 180 segundos entre cada leitura, totalizando um período de aproximadamente 10 horas para a esta amostra. O resultado obtido é apresentado na Figura 28.

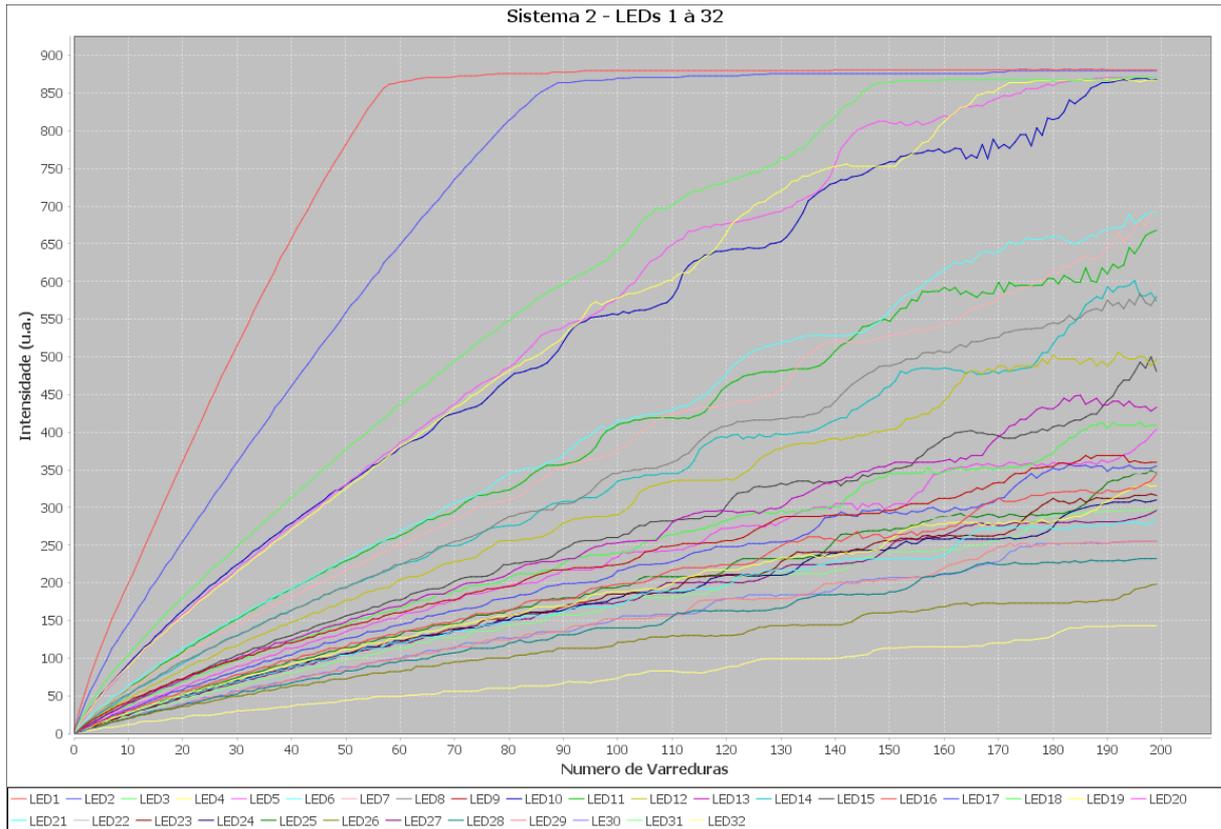


Figura 28 - Curva da Sedimentação do Solo TRE.

Na terceira amostra foi utilizada uma mistura de água destilada e solo LVE (Latossolo Vermelho-Escuro), de textura pouco mais argilosa do que o TRE, ou seja, apresenta partículas levemente menores e, conseqüentemente, menor densidade. Nesta última análise, o software também foi programado para realizar 200 varreduras, com intervalo de 216 segundos, totalizando um período de aproximadamente 12 horas para a amostra, e apresentando as curvas dadas na Figura 29.

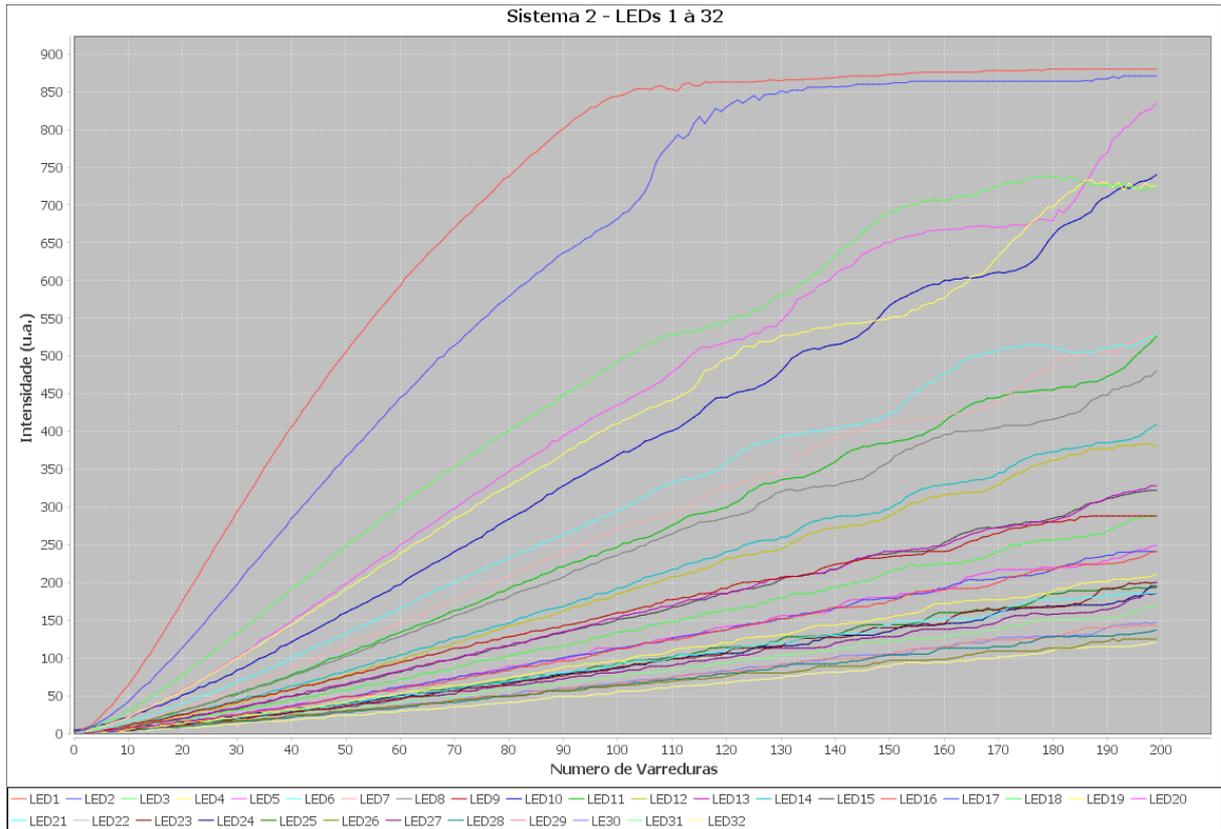


Figura 29 - Curva da Sedimentação do Solo LVE.

As curvas obtidas para os LEDs em cada um dos experimentos pertencem à família de curvas com formato sigmóide, isto é, em forma de “S”, a qual é caracterizada por possuir limites assintóticos (superior e inferior) e taxa de crescimento exponencial, que se modifica em função de uma variável independente (SEBER e WILD, 1989), a qual WEIBULL, em sua proposição original em 1951, já previa a aplicabilidade desse modelo a vários campos da ciência.

Para análise da viabilidade técnica do equipamento, as curvas obtidas devem ter o comportamento descrito de acordo com as Leis de Beer-Lambert e de Stokes. Assim, para se analisar as curvas em um mesmo gráfico, as curvas do primeiro LED de cada amostra foram plotadas, utilizando o software Matlab, e o resultado dado na Figura 30, onde o tempo no eixo x está em minutos. Foi escolhido o LED 1 pois no tempo total das amostras garante-se que quase 100% das partículas já estejam abaixo dessa altura.

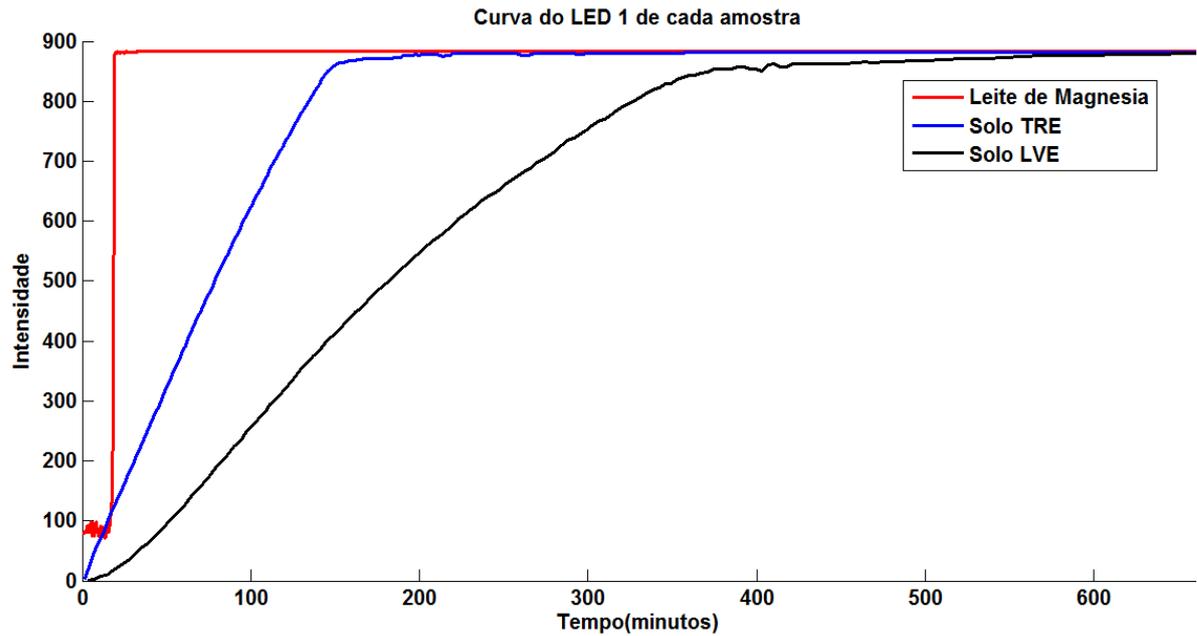


Figura 30 - Curvas do LED 1 para as três amostras.

Nota-se que cada uma das curvas começam com uma baixa intensidade, caracterizando uma alta absorbância da amostra na altura do LED, e com o passar do tempo a amostra vai sedimentando, diminuindo assim a quantidade de partículas na altura do LED observado, logo, diminuindo a absorbância e aumentando a transmitância e a intensidade capturada pelo fotodiodo, o que demonstra que o comportamento está de acordo com a Lei de Beer-Lambert.

Uma análise qualitativa da velocidade de sedimentação pode ser feita observando-se o intervalo de subida em relação ao tempo de sedimentação das amostras. Como o número de varreduras para as três amostras foi constante (200 varreduras), a velocidade de sedimentação se relaciona à inclinação da porção exponencial das curvas sigmóides. Observa-se que a curva do leite de magnésia, a qual apresenta partículas com as maiores massas entre as três amostras, é a que apresenta a maior inclinação e, conseqüentemente, a maior velocidade de sedimentação, seguida pela do solo 2 (TRE) e, por último, a do solo 3 (LVE). Ou seja, as velocidades terminais de sedimentação mostraram-se proporcionais à massa das partículas em queda, assim como enunciado na Lei de Stokes.

O protótipo desenvolvido mostrou-se eficiente para se atingir os objetivos propostos de análise da viabilidade técnica. Pode-se observar que diferentes amostras e diferentes intervalos de tempo de amostragem forneceram resultados

coerentes com a teoria e mostraram-se de acordo com as Leis de Beer-Lambert e de Stokes.

O software desenvolvido para o processamento e exibição dos dados em forma gráfica foi testado e foi verificada sua aplicabilidade neste gerenciamento, mostrando-se eficaz tanto na aquisição dos dados quanto na exibição destes em forma gráfica de tabs. Apesar do software de interface enviar apenas um sinal de comando e não monitorar constantemente a aquisição de dados, como feito pelo protótipo já existente na Embrapa Instrumentação, o equipamento não apresentou problemas em relação a isso, demonstrando a independência do firmware desenvolvido para o PIC.

5 Conclusão

Com o protótipo proposto e implementado neste projeto de conclusão de curso foi possível atingir os objetivos estabelecidos, ou seja, as curvas de caracterização da sedimentação de amostras apresenta alta fidelidade aos resultados teóricos esperados. Isso nos leva a crer que este novo método de Análise Granulométrica possa ser empregado futuramente nesta análise e se obter resultados semelhantes aos dos métodos hoje já existentes, com a vantagem de utilizar uma fonte de emissão não radiativa, apresentar um relativo baixo custo e ainda assim permitir uma análise semelhante aos métodos mais rápidos e eficientes.

Como trabalho inicial neste assunto, este trabalho abre um campo de estudo maior. Os dados obtidos mostraram alta fidelidade aos resultados teóricos esperados e utilizados pelos métodos de análise já existentes na literatura, mostrando assim que o sistema esta apto a ser utilizado em aplicações de Análise Granulométrica.

6 Sugestões para trabalhos Futuros

Assim como nos métodos de sedimentação existentes, para a utilização do equipamento desenvolvido no presente trabalho na análise granulométrica de solos, é necessário o desenvolvimento de equações específicas para a utilização do método e para que o processamento de dados possa fornecer informações sobre a característica textural de solos.

Assim, pode ser realizado um estudo mais a fundo sobre a relação entre as equações utilizadas pelo método por atenuação de raios gama, seus coeficientes e as possíveis equações e medidas que devem ser desenvolvidas para a aplicação por completo do método desenvolvido na análise granulométrica de solos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARYA, L. M. et al. Scaling parameter to predict the soil water characteristic from particle-size distribution data. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 63, p. 1063-1070, 1999.
- ARYA, L. M.; PARIS, J. F. A physicoempirical model to predict soil moisture characteristics from particle-size distribution and bulk density data. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 45, p. 1023-1030, 1981.
- ASHWORTH, J. et al. Standard procedure in the hydrometer method for particle size analysis. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Amsterdam, , v. 32, n. 5/6, p. 633-642, Abril 2001.
- BAVER, L. D.; GARDNER, W. H.; GARDNER, W. R. **Soil physics**. 4th. ed. New York: John Wiley, 1972. 498 p.
- BOYLESTAD, R. L.; NASHESKY, L. **Electronic Devices and Circuit Theory**. [S.l.]: Englewood Cliffs, 1972.
- BUCHAN, G. D. et al. A comparison of sedigraph and pipette methods for soil particle-size analysis. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v. 31, n. 2, p. 407-417, 1993.
- BUURMAN, P.; PAPE, T. H.; C.C., M. Laser grain size determination in soil genetic studies. 1. Practical problems. **Soil Science**, New Brunswick, v. 162, n. 3, p. 211–218, March 1997.
- CMP VAZ, J. D. O. K. R. S. C. P. C. O. B. Soil mechanical analysis through gamma ray attenuation. **Soil technology**, v. 5, n. 4, p. 319-325, 1992.
- COOPER, L. R.; HAVERLAND, R. L.; HENDRICKS, D. M. Microtrac particle-size analyser: an alternative particle-size determination method for sediment and soils. **Soil Science**, New Brunswick, v. 138, n. 2, p. 138-146, Aug 1984.
- DASGUPTA, P. K. et al. Light-emitting diode based flow-through optical-absorption detectors. **Talanta**, London, v. 40, n. 1, p. 53-74, 1993.
- DAY, P. R. Particle fractionation and particle-size analysis. In: BLACK, C. A. **Methods of soil analysis**. Madison: Soil Science Society of America, 1965. p. 545-567.
- DORAN, J. W. & P. T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BZEDICEK, D. F. & S. B. A. . E. **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: Soil Science Society of America , 1994. p. 3-21. (Special Publication, 35).
- ELLIOTT, E. T. et al. Soil structural and other physical properties. In: ROBERTSON, G. P., et al. **Standard soil methods for long-term ecological research**. New York: Oxford University, 1999. p. 74-85.
- ESHEL, G. et al. Critical evaluation of the use of laser diffraction for particle-size distribution analysis. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 68, n. 3, p. 736–743, Maio/Jun 2004.

GEE, G. W.; J.W., B. Particle size analysis by hydrometer: a simplified method for routine textural analysis and a sensitivity test of measured parameters. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 43, n. 5, p. 1004-1007, Sept./Oct 1979.

GEE, G. W.; OR, D. Particle-size analysis. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. (.). **Methods of soil analysis**. 3rd. ed. Madison: Soil Science Society of America, 2002. p. 255-293. (Book Series, 5).

HECHT, E. **Optics**. 2nd. ed. New York: Wesley Publishing Company, 1990.

JENNINGS, D. S.; THOMAS, M. D.; GARDNER, W. A new method of mechanical analysis of soils. **Soil Science** , v. 14, n. 6, p. 485-499, July/Dec 1922.

KARSTEN, J. H. M.; KOTZE., W. A. G. Soil particle-size analysis with gamma attenuation technique. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Amsterdam, v. 15, n. 6, p. 731-739, 1984.

KRUMBEIN, W. C. A history of the principles and methods of mechanical analysis. **Journal of Sedimentary Petrology**, Tulsa, v. 2, p. 89-124, Aug. 1932.

LOVELAND, P. J.; WHALLEY, W. R. Particle size analysis. In: SMITH, K. A.; MULLIN, C. E. (.). **Soil and environmental analysis: physical methods**. 2nd. ed. New York: Marcel Dekker, 2000. Cap. 7, p. 281-314.

MARTIN NETO, L.; VAZ, C. M. P.; CRESTANA, S. **Instrumentação avançada em ciência do solo**. 1st. ed. Brasília: EMBRAPA, v. 1, 2007.

MILLER, W. P.; RADCLIFFE, D. E.; MILLER, D. M. An historical perspective on the theory and practice of soil mechanical analysis. **Journal of Agronomic Education**, Madison, v. 17, n. 1, p. 24-28, 1988.

MILLER, W. P.; RADCLIFFE, D. E.; MILLER, D. M. An historical perspective on the theory and practice of soil mechanical analysis. **Journal of Agronomic Education**, Madison, v. 17 , n. 1, p. 24-28, 1988.

NAIME, J. M.; VAZ, C. M. P.; MACEDO, A. Automated soil particle size analyzer based on gamma-ray attenuation. **Computers and Electronics in Agriculture**, Sao Carlos, p. 295-304, 2001.

SEBER, G. A. F.; WILD, C. J. **Nonlinear Regression**. New York: John Wiley & Sons, 1989.

SKOOG, D. A. et al. **Fundamentals of Analytical Chemistry**. 8th. ed. [S.l.]: [s.n.], 2003.

STOKES, G. G. On the effect of the internal friction of fluids on the motion of pendulums. **Transaction of the Cambridge Philosophical Society**, Cambridge, v. 9, n. 2, p. 8-106, 1851.

SUGUIO, K. **Introdução à sedimentologia**. São Paulo: Edgard Blücher - EDUSP, 1973.

TAN, K. H. **Soil sampling, preparation and analysis**. New York: Marcel Dekker, 1996.

TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; ROSSI JUNIOR, W. Resistência tênsil e friabilidade de um latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 33-42, fev. 2008.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um latossolo roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 22, p. 573-581, 1998.

TROJANOWICZ, M.; WORSFOLD, P. J.; CLINCH, J. R. Solid-state photometric detectors for flow injection analysis. **Trends in Analytical Chemistry**, Amsterdam, v. 7, n. 8, p. 301-305, 1988.

WEIBULL, W. A Statistical Distribution Function of Wide Applicability. **Journal of Applied Mechanics**, Fairfield, v. 73, p. 293-297, 1951.

WU, Q.; BORKOVEC, M.; STICHER, H. On particle-size distributions in soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 57, n. 4, p. 883-890, July/Aug 1993.

APÊNDICE A – Descrição da pinagem do PIC 16F876A

Tabela A-1 - Tabela de Descrição da pinagem do PIC16F876A

Pin Name	PDIP, SOIC, SSOP Pin#	QFN Pin#	I/O/P Type	Buffer Type	Description
OSC1/CLKI OSC1 CLKI	9	6	 I I	ST/CMOS ⁽³⁾	Oscillator crystal or external clock input. Oscillator crystal input or external clock source input. ST buffer when configured in RC mode; otherwise CMOS. External clock source input. Always associated with pin function OSC1 (see OSC1/CLKI, OSC2/CLKO pins).
OSC2/CLKO OSC2 CLKO	10	7	 O O	—	Oscillator crystal or clock output. Oscillator crystal output. Connects to crystal or resonator in Crystal Oscillator mode. In RC mode, OSC2 pin outputs CLKO, which has 1/4 the frequency of OSC1 and denotes the instruction cycle rate.
MCLR/VPP MCLR VPP	1	26	 I P	ST	Master Clear (input) or programming voltage (output). Master Clear (Reset) input. This pin is an active low Reset to the device. Programming voltage input.
RA0/AN0 RA0 AN0	2	27	I/O I	TTL	PORTA is a bidirectional I/O port.
RA1/AN1 RA1 AN1	3	28	I/O I	TTL	Digital I/O. Analog input 0.
RA2/AN2/VREF-/ CVREF RA2 AN2	4	1	I/O I I	TTL	Digital I/O. Analog input 1.
VREF- CVREF	5	2	O	TTL	Digital I/O. Analog input 2. A/D reference voltage (Low) input. Comparator VREF output.
RA3/AN3/VREF+ RA3 AN3 VREF+	6	3	I/O I I	ST	Digital I/O. Analog input 3. A/D reference voltage (High) input.
RA4/T0CKI/C1OUT RA4 T0CKI C1OUT	7	4	I/O I O I/O	TTL	Digital I/O – Open-drain when configured as output. Timer0 external clock input. Comparator 1 output.
RA5/AN4/SS/C2OUT			I		

RA5 AN4 SS C2OUT			O		Digital I/O. Analog input 4. SPI slave select input. Comparator 2 output.
-------------------------------	--	--	---	--	--

Legend: I = input O = output I/O = input/output P = power
— = Not used TTL = TTL input ST = Schmitt Trigger input

- Note** 1: This buffer is a Schmitt Trigger input when configured as the external interrupt.
2: This buffer is a Schmitt Trigger input when used in Serial Programming mode.
3: This buffer is a Schmitt Trigger input when configured in RC Oscillator mode and a CMOS input otherwise.

TABLE 1-2: PIC16F873A/876A PINOUT DESCRIPTION (CONTINUED)

Pin Name	PDIP, SOIC, SSOP Pin#	QFN Pin#	I/O/P Type	Buffer Type	Description
RB0/INT RB0 INT	21	18	I/O I	TTL/ST ⁽¹⁾	PORTB is a bidirectional I/O port. PORTB can be software programmed for internal weak pull-ups on all inputs. Digital I/O. External interrupt.
RB1	22	19	I/O	TTL	Digital I/O.
RB2	23	20	I/O	TTL	Digital I/O.
RB3/PGM RB3 PGM	24	21	I/O I	TTL	Digital I/O. Low-voltage (single-supply) ICSP programming enable pin.
RB4	25	22	I/O	TTL	Digital I/O.
RB5	26	23	I/O	TTL	Digital I/O.
RB6/PGC RB6	27	24	I/O I	TTL/ST ⁽²⁾	Digital I/O. In-circuit debugger and ICSP programming

PGC					clock.
RB7/PGD RB7 PGD	28	25	I/O I/O	TTL/ST ⁽²⁾	Digital I/O. In-circuit debugger and ICSP programming data.
RC0/T1OSO/T1CKI RC0 T1OSO T1CKI	11	8	I/O O I	ST	PORTC is a bidirectional I/O port. Digital I/O. Timer1 oscillator output. Timer1 external clock input.
RC1/T1OSI/CCP2 RC1 T1OSI CCP2	12	9	I/O I I/O	ST	Digital I/O. Timer1 oscillator input. Capture2 input, Compare2 output, PWM2 output.
RC2/CCP1 RC2 CCP1	13	10	I/O I/O	ST	Digital I/O. Capture1 input, Compare1 output, PWM1 output.
RC3/SCK/SCL RC3 SCK SCL	14	11	I/O I/O I/O	ST	Digital I/O. Synchronous serial clock input/output for SPI mode. Synchronous serial clock input/output for I ² C mode.
RC4/SDI/SDA RC4 SDI SDA	15	12	I/O I I/O	ST	Digital I/O. SPI data in. I ² C data I/O.
RC5/SDO RC5 SDO	16	13	I/O O	ST	Digital I/O. SPI data out.
RC6/TX/CK RC6 TX CK	17	14	I/O O I/O	ST	Digital I/O. USART asynchronous transmit. USART1 synchronous clock.
RC7/RX/DT RC7 RX DT	18	15	I/O I I/O	ST	Digital I/O. USART asynchronous receive. USART synchronous data.
VSS	8, 19	5, 6	P	—	Ground reference for logic and I/O pins.
VDD	20	17	P	—	Positive supply for logic and I/O pins.

Legend: I = input O = output I/O = input/output P = power
— = Not used TTL = TTL input ST = Schmitt Trigger input

Note 1: This buffer is a Schmitt Trigger input when configured as the external interrupt.

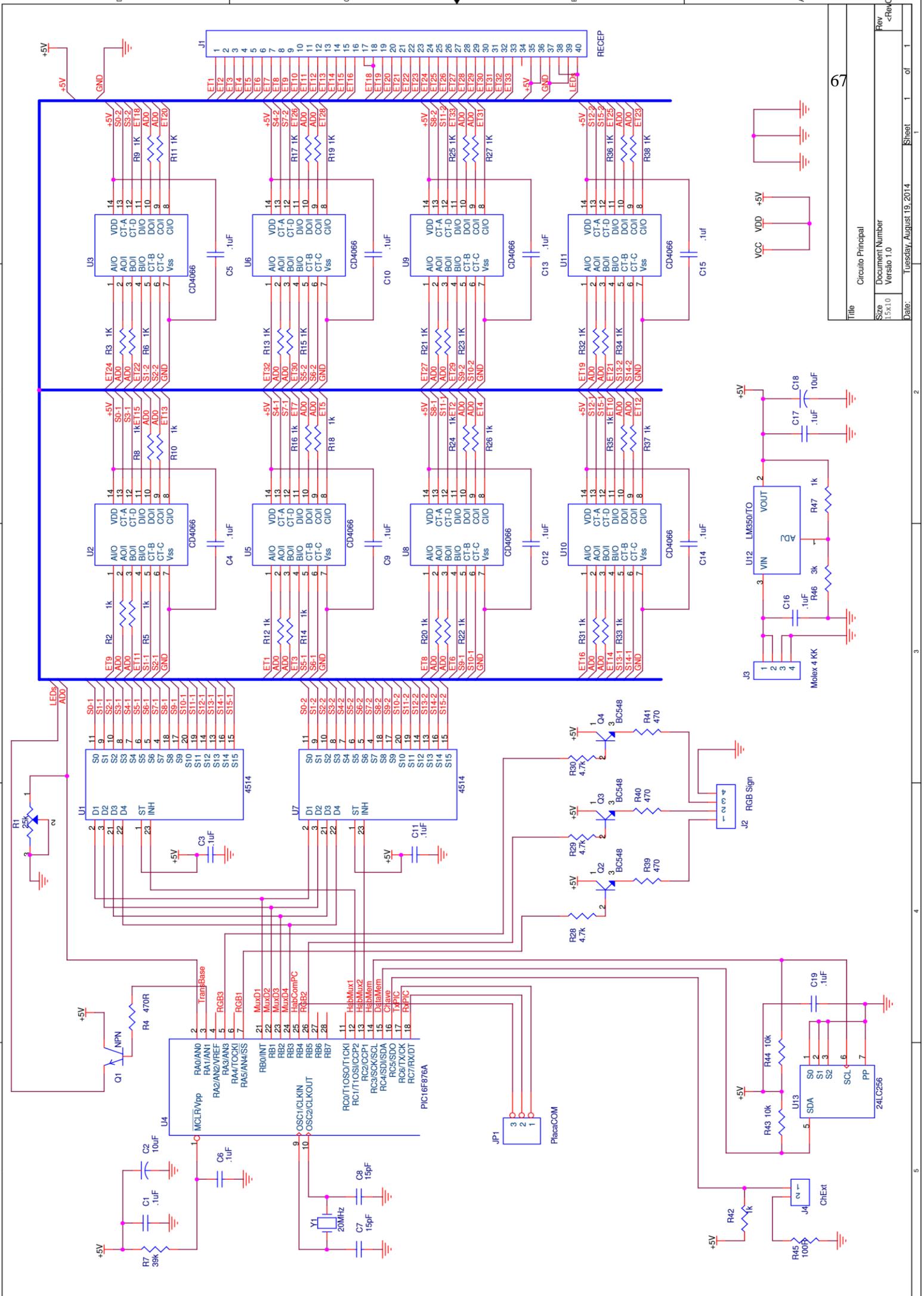
2: This buffer is a Schmitt Trigger input when used in Serial Programming mode.

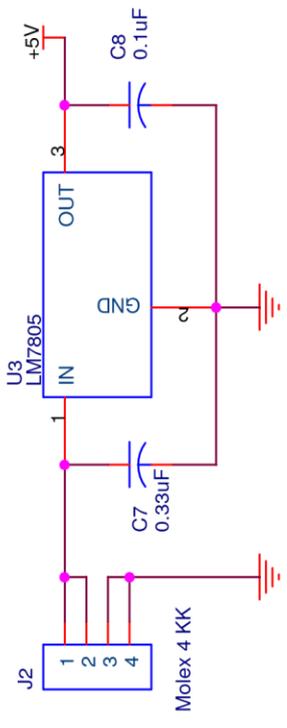
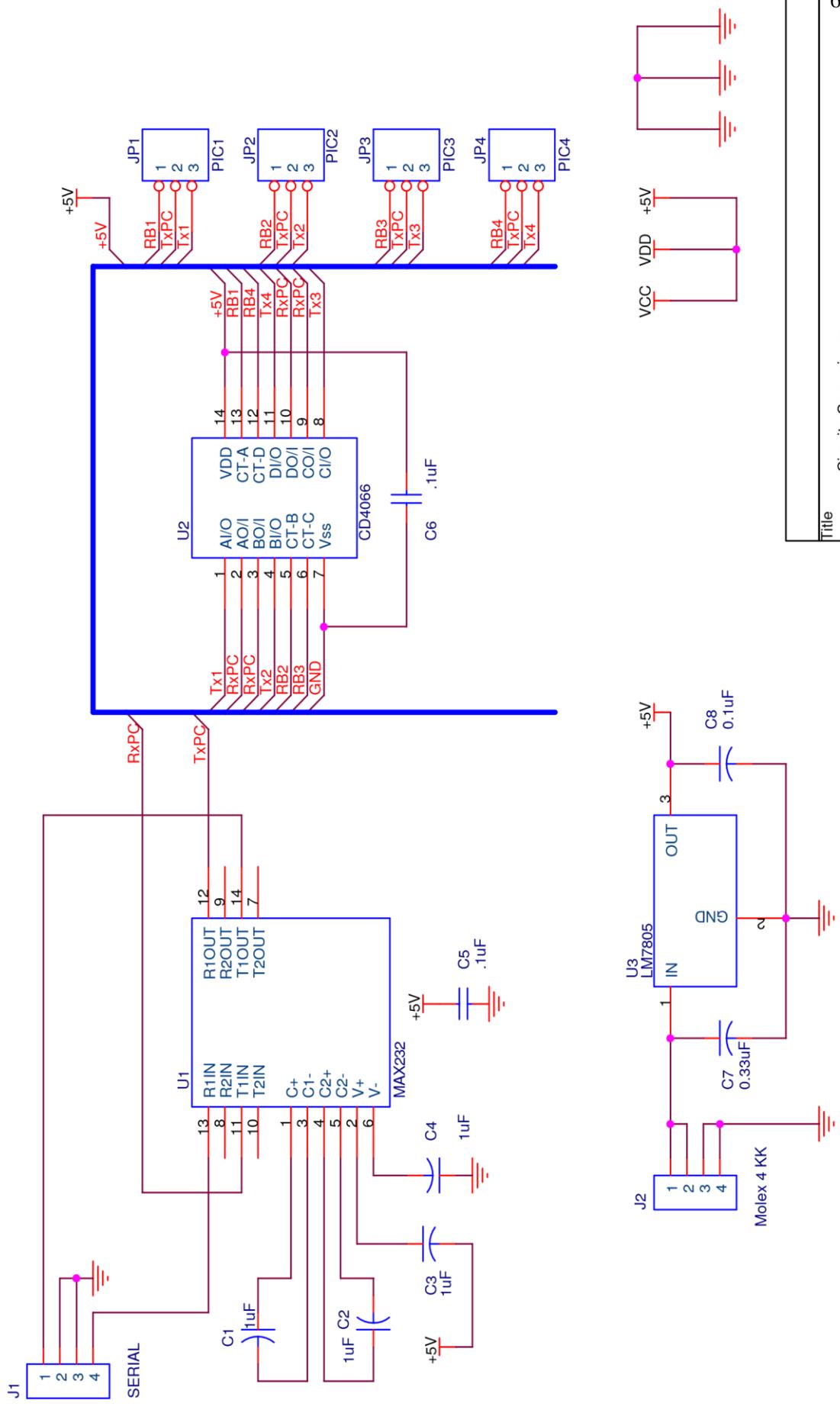
3: This buffer is a Schmitt Trigger input when configured in RC Oscillator mode and a CMOS input otherwise

Anexo I – Circuitos de Hardware

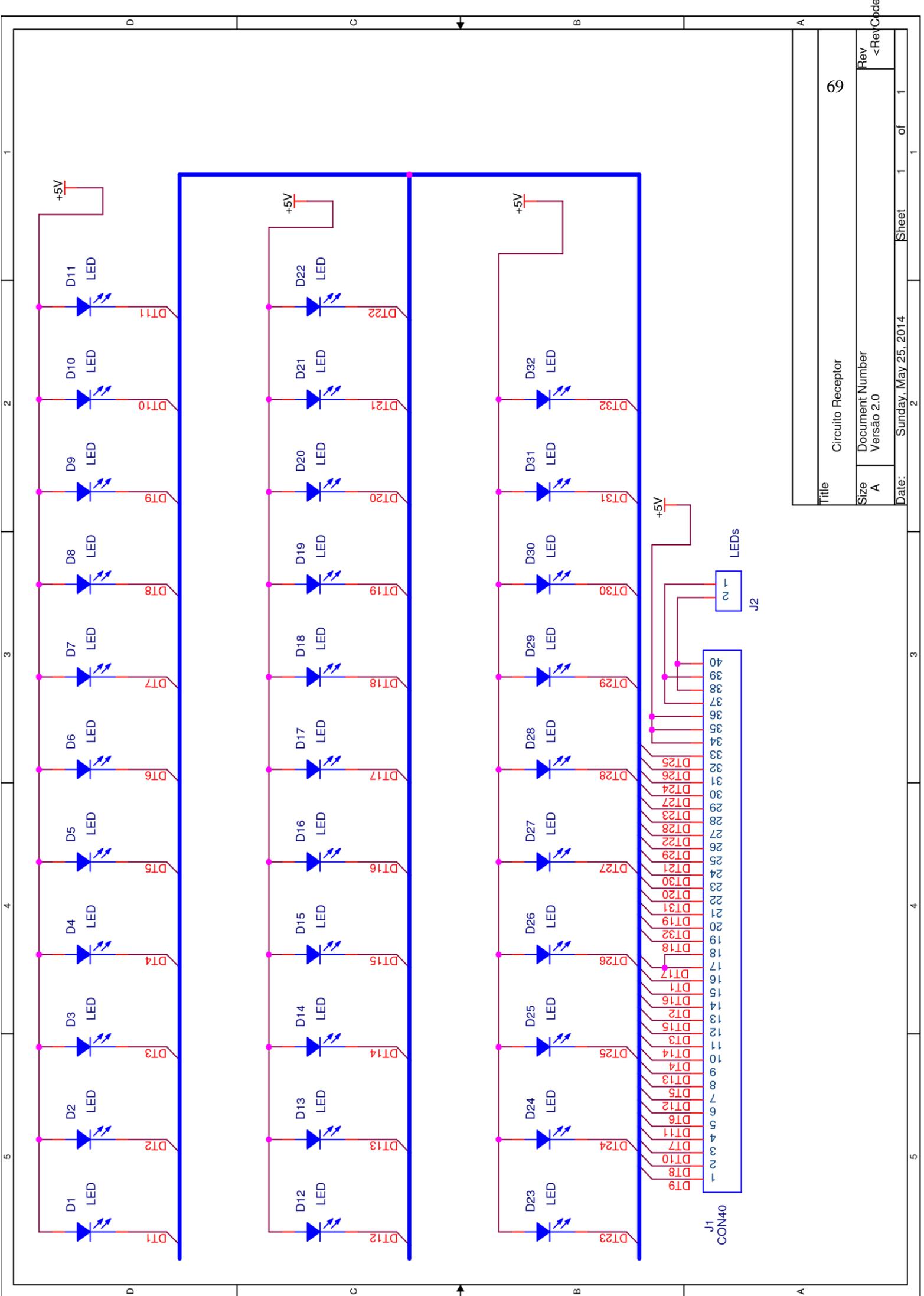
Este anexo apresenta os circuitos do hardware completo desenvolvido para o projeto do Analisador Granulométrico. Os circuitos estão divididos da seguinte maneira:

- Circuito 1 – Circuito Principal: Circuito de Chaveamento dos Fotodiodos, Driver dos LEDs , Memória EEPROM, Alimentação.
- Circuito 2 – Circuito de comunicação: Circuito de Interface, Circuito de Seleção.
- Circuito 3 – Circuito de Recepção: Circuito de Recepção dos Fotodiodos.
- Circuito 4 – Circuito dos LEDs: Circuito dos LEDs.

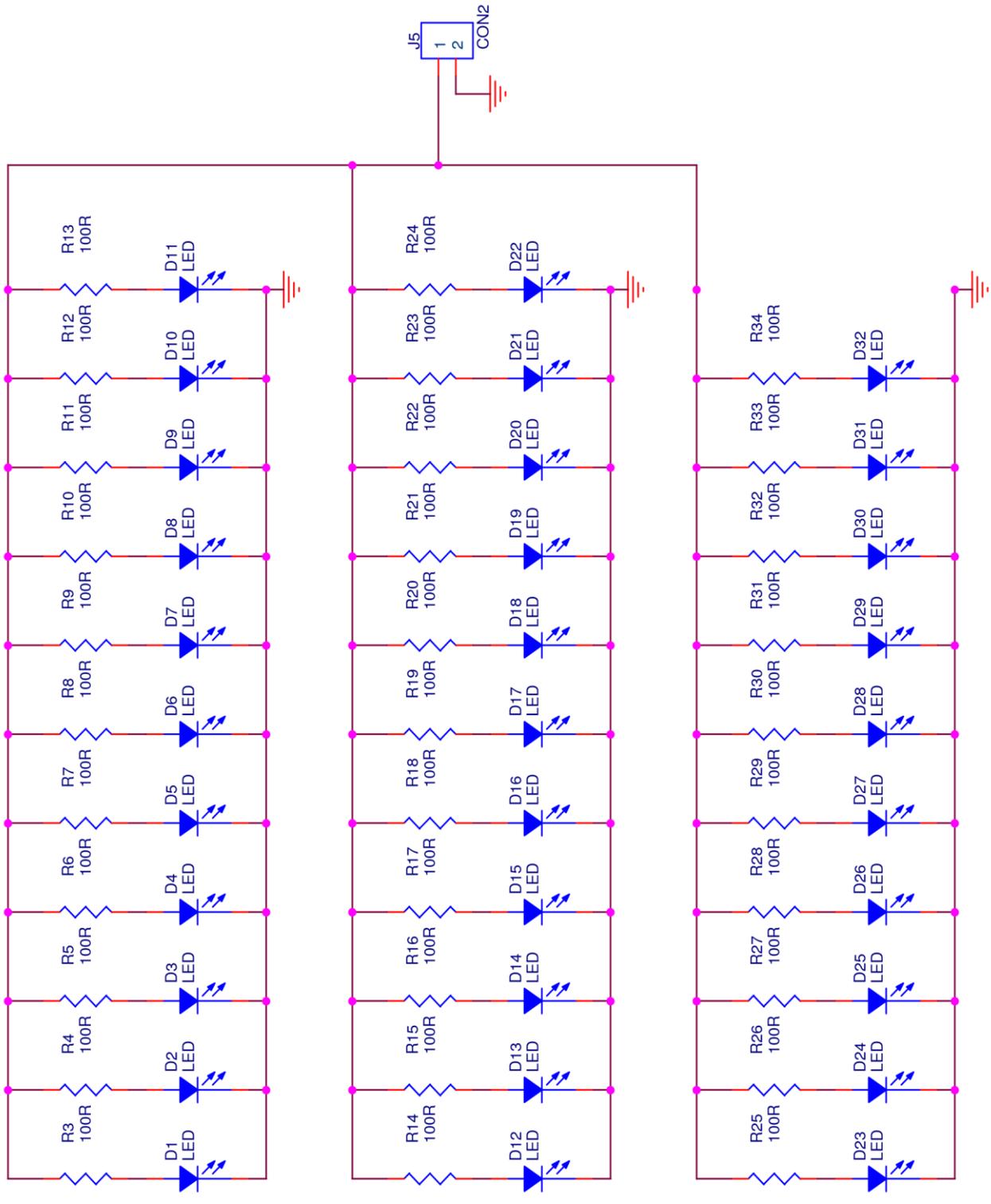




Title		Circuito Comunicacao		68	
Size	A	Document Number	<Doc>	Rev	<RevCode>
Date:	Sunday, May 25, 2014	Sheet	1	of	1



Title		Circuito Receptor	
Size	A	Document Number	69
Rev	<Rev	Versão	2.0
Date:	Sunday, May 25, 2014	Sheet	1 of 1



Title		Circuito LEDs	
Size	A	Document Number	70
Rev	<Doc>	Rev	<RetCode>
Date:	Saturday, October 11, 2014	Sheet	1 of 1

Grid coordinates: D, C, B, A (vertical); 1, 2, 3, 4, 5 (horizontal)