



UNIVERSIDADE  
ESTADUAL DE LONDRINA

---

DIOGO KAORU TAKAYAMA

DESENVOLVIMENTO DE UM TRANSDUTOR DE  
UMIDADE BASEADO NA REFLEXÃO DIFUSA NO  
INFRAVERMELHO PRÓXIMO

DIOGO KAORU TAKAYAMA

**DESENVOLVIMENTO DE UM TRANSDUTOR DE  
UMIDADE BASEADO NA REFLEXÃO DIFUSA NO  
INFRAVERMELHO PRÓXIMO**

Dissertação de mestrado submetido à Universidade Estadual de Londrina como parte dos requisitos para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Dr. José Alexandre de França.

Londrina  
2009

### Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

T136d Takayama, Diogo Kaoru.  
Desenvolvimento de um Transdutor de umidade baseado na reflexão difusa no infravermelho. / Diogo Kaoru Takayama – Londrina, 2009.  
87 f. : il.

Orientador: José Alexandre de Souza.  
Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Londrina, Centro de Tecnologia e Urbanismo, 2009.  
Inclui bibliografia.

1. Medição de umidade – Teses. 2. Medidor *On-line* – Teses. 3. Infravermelho próximo – Teses 4. NIR – Teses I. Souza, José Alexandre de. II. Universidade Estadual de Londrina. III. Título.

CDU 621.318.43

DIOGO KAORU TAKAYAMA

**DESENVOLVIMENTO DE UM TRANSDUTOR DE UMIDADE  
BASEADO NA REFLEXÃO DIFUSA NO INFRAVERMELHO  
PRÓXIMO**

‘Este trabalho foi julgado adequado para a obtenção do título de mestre em engenharia elétrica e aprovado em sua forma final pela Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Londrina.’

Dissertação de mestrado submetido à Universidade Estadual de Londrina como parte dos requisitos para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Elétrica.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Orientador: Dr. José Alexandre de França  
Universidade Estadual de Londrina - UEL

---

Dr. Carlos Alberto dos Reis Filho  
Universidade Federal do ABC

---

Dr. Carlos Alberto P. da Camara  
Universidade Estadual de Londrina - UEL

---

Dr. Dari de Oliveira Toginho Filho  
Universidade Estadual de Londrina - UEL

---

Dr. Marcelo de Carvalho Tosin  
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Londrina, 10 de março de 2009.

# Agradecimentos

Agradeço a Deus.

Aos meus pais e a minha batchan que sempre me apoiaram.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Jose Alexandre de Franca, que me ajudou e cooperou com o desenvolvimento deste trabalho.

A todos os professores deste departamento e de outros departamento, que me ajudaram com seus conhecimentos, para que fosse possível a conclusão deste trabalho.

Aos amigos, colegas de curso e a todos aqueles que, de alguma forma, me ajudaram.

Resumo da dissertação apresentada à UEL como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de mestre em Engenharia Elétrica.

# Desenvolvimento de um Transdutor de Umidade Baseado na Reflexão Difusa no Infravermelho Próximo

Diogo Kaoru Takayama

MARÇO/2009

Orientador: Dr. José Alexandre de França

Área de Concentração: Instrumentação Eletrônica

Palavras-chave: Medição de Umidade, Medidor *On-line*, infravermelho próximo, NIR

Em diversos setores da indústria, a medição de umidade é uma tarefa fundamental como, por exemplo, na indústria alimentícia, de processamento/esmagamento de grãos, de papel, usinas de açúcar etc. O método clássico de medição de umidade requer uma análise da amostra em laboratório. Este é um processo destrutivo, caro e demorado. Além do mais, como a umidade da matéria-prima pode variar bastante ao longo do dia, são necessárias várias medições em laboratório ao longo do período. Por outro lado, com o processo de medição *on-line* de umidade, a percentagem de água é conhecida instantaneamente, logo tem-se controle do processo de produção sem perdas, com o lucro máximo e qualidade. Atualmente, existem poucos fabricantes deste tipo de equipamento e não existe nenhum fabricante neste país, o que resulta em um custo elevado para indústrias pequenas. A presente dissertação apresenta o desenvolvimento de um transdutor de umidade baseado no infravermelho próximo. O equipamento é fundamentado no princípio de reflexão difusa da luz, onde partículas da água são detectadas por infravermelho próximo. O objetivo do desenvolvimento deste transdutor é a melhoria do sistema e uma diminuição nos preços de venda. Para isto, foram utilizados LEDs para emissão da radiação infravermelha, aumentando a vida útil do sistema com a eliminação das partes móveis do equipamento e, conseqüentemente, a solução do problema de fixação em locais que apresentam vibrações. Além disso, com a adição de um sistema de controle de temperatura, o problema de influência da temperatura ambiente no equipamento foi eliminado. Os testes foram realizados em laboratório, medindo-se umidade em pó de café para avaliar os circuitos e o resultado final do sistema. Foram implementados testes de sensibilidade, repetibilidade, dependência térmica e imunidade a interferência luminosa, com resultados que demonstraram que a técnica proposta é muito promissora.

Abstract of the dissertation presented to the UEL as part of the necessary requirements for obtaining of the degree of Master in Electric Engineering.

# Development of a Transducer of Humidity Based on the Diffuse Reflection in the Near-Infrared

Diogo Kaoru Takayama

MARCH/2009

Advisor: Phd. José Alexandre de França

Concentration Area: Electronic instrumentation

Keywords: Humidity measurement, On-line measurement, Near-infrared, NIR

In various sectors, humidity measurement is a crucial task, for instance in the food industry, grain processing/crushing, sugar plants, etc. The conventional humidity measurement method requires a lab sample analysis. This is a destructive, expensive and slow process. Besides, as raw material humidity may vary considerably during the day, many measurements are required throughout the period. On the other hand, with an online humidity measurement process, the water amount is known instantly, without physical contact with the sample. Thus, the production process control can be carried out without losses, with maximum profit and quality. Currently, there are few manufacturers of this kind of equipment, in particular none in this country, which results in high costs for small industries. This dissertation presents the development of an humidity transducer based on near-infrared radiation. The equipment is based on the principle of diffuse reflection of light, where particules of water are detected by near-infrared radiation. In developing this transducer, the goal was to improve the system and reduce cost. To that end, we employed LEDs for producing infrared radiation, increasing the system's useful life through elimination of moving parts, and consequently, solving the problem of installation in locations subject to vibration. With the addition of a temperature control system, the problem of environment temperature influence on the equipment was eliminated. Tests were performed in laboratory, measuring coffee powder humidity to evaluate the circuits and the system's final result. We implemented various tests such as sensibility, repeatability, thermal dependence and immunity to light interference, with results that show that the proposed technique is very promising.

# Lista de Figuras

Figura 2.1:	Representação da onda eletromagnética, composta pela onda elétrica e magnética (LABGIS, 2008).....	19
Figura 2.2:	NIR no espectro eletromagnético.....	19
Figura 2.3:	Transição entre níveis vibracionais.....	20
Figura 2.4:	Estados vibracionais para a água.....	22
Figura 2.5:	Equipamento simples (feixe simples e um único filtro).....	27
Figura 2.6:	Equipamento com vários filtros.....	28
Figura 2.7:	Equipamento com dois feixes NIR.....	28
Figura 3.1:	Equipamento proposto.....	31
Figura 3.2:	Arranjo de espelhos para concentrar a radiação (espelho plano).....	32
Figura 3.3:	Arranjo de espelhos para concentrar a radiação (espelho concavo).....	32
Figura 3.4:	Arranjo de espelhos para concentrar a radiação (espelho convexo).....	32
Figura 3.5:	Diagrama dos blocos funcionais do sistema.....	33
Figura 3.6:	Configuração montada para especificar os comprimentos de onda.....	34
Figura 3.7:	Gráfico das medições com soja.....	34
Figura 3.8:	Gráfico das variâncias das medidas.....	35
Figura 3.9:	Gráfico das medições com aveia.....	36
Figura 3.10:	Gráfico das medições do farelo de soja seco em estufa.....	36
Figura 3.11:	Medições do farelo de soja seco em estufa na faixa de 970 nm.....	37
Figura 3.12:	Medições do farelo de soja seco em estufa na faixa de 1200 nm.....	37
Figura 3.13:	Medições do farelo de soja seco em estufa na faixa de 1450 nm.....	38
Figura 3.14:	Gráfico das medições na primeira amostra de aveia.....	38
Figura 3.15:	Gráfico das variâncias das medidas da aveia.....	39
Figura 3.16:	Gráfico das medições na amostra de milho.....	40
Figura 3.17:	Circuito de acionamento dos emissores (LED).....	41
Figura 3.18:	Formas de onda do circuito, com V3 a tensão de controle de acionamento e a corrente em D5 (LED) e a corrente no diodo de proteção D3.....	42
Figura 3.19:	Forma de onda do circuito, com o transistor Q4 como <i>driver</i> do LED e o transistor Q3 auxiliar.....	43

Figura 3.20:	Forma de onda do circuito, com D3 como diodo de protecao para o LED (D5) .....	43
Figura 3.21:	Circuito de amplificaco dos sensores .....	45
Figura 3.22:	Formas de onda do circuito da Figura 3.21 com sinal de entrada sem <i>offset</i> .....	45
Figura 3.23:	Formas de onda do circuito da Figura 3.21 com <i>offset</i> 400 vezes maior que o sinal de entrada.....	46
Figura 3.24:	Diagrama da primeira opo do sistema eletrônico.....	47
Figura 3.25:	Circuito do filtro passa-faixa.....	47
Figura 3.26:	Resposta do circuito do filtro passa-faixa .....	47
Figura 3.27:	Circuito de retificaco do sinal AC .....	48
Figura 3.28:	Formas de onda do circuito da Figura 3.27.....	49
Figura 3.29:	Circuito do detector de pico.....	50
Figura 3.30:	Resposta do detector de pico .....	50
Figura 3.31:	Circuito de comparaco e amplificaco do sensor LM35 .....	51
Figura 3.32:	Circuito de controle do elemento Peltier.....	52
Figura 3.33:	Resposta do circuito de controle do elemento Peltier .....	52
Figura 4.1:	Imagem da tela de programaco do programa no LabVIEW .....	55
Figura 4.2 :	Imagem da tela de visualizaco do programa no LabVIEW.....	55
Figura 4.3:	Montagem atual do equipamento .....	57
Figura 4.4:	Valores obtidos pelo equipamento proposto na faixa de 970nm .....	57
Figura 4.5:	Valores obtidos pelo equipamento proposto na faixa de 1200nm .....	58
Figura 4.6:	Valores obtidos pelo equipamento proposto na faixa de 1450nm .....	58
Figura 4.7:	Valores obtidos pelo equipamento proposto nas 3 faixas de absoro da gua .....	59
Figura 4.8:	Tenso vs umidade para verificaco da linearidade.....	60
Figura 4.9:	Valores obtidos pelo equipamento proposto nas 3 faixas de absoro da gua para amostra com 9,09 % de umidade .....	61
Figura 4.10:	Valores obtidos pelo equipamento proposto nas 3 faixas de absoro da gua para amostra com 3,88 % de umidade .....	61
Figura 4.11:	Dependncia da amplitude do sinal com a temperatura.....	63
Figura 4.12:	Valores obtidos pelo equipamento proposto nas 3 faixas de absoro da gua, com interferncia luminosa, para amostra com 9,09 % de umidade .....	63

Figura 4.13:	Valores obtidos pelo equipamento proposto nas 3 faixas de absorção da água, com interferência luminosa, para amostra com 3,88 % de umidade .....	64
Figura 4.14:	Valores obtidos pelo equipamento proposto nas 3 faixas de absorção da água, com interferência luminosa, para amostra com 3,88 % e 9,09 % de umidade .....	65
Figura 4.15:	Indicação no circuito do local da aquisição do gráfico pelo osciloscópio .....	65
Figura 4.16:	Gráfico do osciloscópio para faixa de 970 nm do sinal do sensor, sem interferência luminosa .....	66
Figura 4.17:	Gráfico do osciloscópio para faixa de 970 nm do sinal do sensor, com interferência luminosa.....	66
Figura 4.18:	Gráfico do osciloscópio para faixa de 970 nm depois do filtro passa - alta, sem interferência luminosa .....	67
Figura 4.19:	Gráfico do osciloscópio para faixa de 970 nm depois do filtro passa - alta, com interferência luminosa .....	67
Figura 4.20:	Gráfico do osciloscópio para faixa de 970 nm, depois da amplificação, sem interferência luminosa.....	68
Figura 4.21:	Gráfico do osciloscópio para faixa de 970 nm, depois da amplificação, com interferência luminosa .....	69
Figura 4.22:	Indicação no circuito do local da aquisição do gráfico pelo osciloscópio - filtro passa-faixa .....	69
Figura 4.23:	Gráfico do osciloscópio para faixa de 970 nm, depois do filtro passas-faixa, sem interferência luminosa.....	70
Figura 4.24:	Gráfico do osciloscópio para faixa de 970 nm, depois do filtro passa-faixa, com interferência luminosa .....	70
Figura 4.25:	Indicação no circuito do local da aquisição do gráfico pelo osciloscópio - detector de pico.....	71
Figura 4.26:	Gráfico do osciloscópio para faixa de 970 nm, depois do detector de pico, sem interferência luminosa.....	71
Figura 4.27:	Gráfico do osciloscópio para faixa de 970 nm, depois do detector de pico, com interferência luminosa .....	72
Figura 4.28:	Gráfico do osciloscópio para faixa de 970 nm, com o comparativo da entrada do detector de pico e a saída.....	72
Figura 5.1:	Proposta para montagem futura .....	75

# Sumário

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO .....	11
1.1 Objetivo Geral .....	14
CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÕES TEÓRICA .....	15
2.1 Umidade .....	15
2.2 Radiação Eletromagnética.....	18
2.2.1 Radiação Infravermelha .....	19
2.2.2 Espectroscopia Infravermelha.....	22
2.2.3 Determinação da Umidade .....	22
2.3 Fontes de Emissão de Infravermelho.....	23
2.4 Receptores de Infravermelho .....	24
2.5 Componentes Ópticos .....	25
2.6 Medidores <i>On-line</i> de Umidade Existentes.....	26
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....	30
3.1 Sistema Proposto .....	30
3.2 Circuitos dos Emissores .....	33
3.2.1 Dreno de corrente .....	40
3.2.2 Par diferencial .....	40
3.2.3 <i>Driver</i> de acionamento.....	41
3.2.4 Ajustes dos Emissores .....	44
3.3 Circuitos dos Sensores .....	44
3.3.1 Amplificador .....	44
3.4 Condicionamento do Sinal .....	46
3.4.1 Filtro Passa-Faixa .....	46
3.4.2 Retificador .....	48
3.4.3 Detector de Pico .....	49
3.5 Controle de Temperatura .....	50
3.5.1 Controle de Temperatura .....	51
3.5.2 Ajustes da Temperatura .....	51

<b>CAPÍTULO 4 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS</b> .....	54
<b>4.1 Configuração do Sistema</b> .....	54
4.1.1 Sistema Óptico .....	54
4.1.2 Calculo da Umidade.....	54
<b>4.2 Tipos de Testes</b> .....	56
4.2.1 Sensibilidade.....	56
4.2.2 Repetibilidade.....	60
4.2.3 Dependência Térmica do Receptor .....	62
4.2.4 Imunidade a Interferência Luminosa .....	62
<b>CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES</b> .....	73
<b>5.1 Propostas Futuras</b> .....	74
<b>Referências</b> .....	76
<b>Apêndice A - Artigo</b> .....	80

---

# INTRODUÇÃO

---

Os grãos, sementes e alimentos são extremamente perecíveis, mas podem ser armazenados por um longo período se tratados adequadamente. Vários fatores influenciam a manutenção da qualidade dos produtos, mas, dentre muitas variáveis, a umidade é o fator isolado mais importante, pois a quantidade de água é responsável pela atividade biológica e as mudanças químicas e físicas. Diminuindo a umidade, reduz-se a atividade biológica, a velocidade das reações químicas e o desenvolvimento de microorganismos (Goneli et al., 2007).

Neste contexto, o presente trabalho apresenta um transdutor de umidade baseado na reflexão difusa no infravermelho próximo. Tal transdutor mede a umidade de forma não-destrutiva e com um tempo de resposta curto, para que possa ser utilizado em linhas de produção sem que haja perdas de produtos durante a medição.

Em indústrias de alimentos, o teor de umidade do grão é o ponto crítico para uma armazenagem de qualidade. Grãos com altos teores de umidade são muito vulneráveis à altas populações de insetos e fungos. Para uma armazenagem segura, é necessário secar o grão, forçando a passagem do ar aquecido através da massa de grãos ou secando-o com ar natural. Embora o fluxo de ar durante a aeração seja tão baixo a ponto de não reduzir a umidade do grão (quando realizado à temperatura natural), uma aeração excessiva pode reduzir o teor de umidade e conseqüentemente o peso.

Grãos com umidade adequada e uniformemente distribuída por toda a massa podem permanecer armazenados com segurança por longo período de tempo. Quando não há aeração, a umidade migra de um ponto para outro. Esta movimentação da umidade ocorre em função de diferenças significativas na temperatura dentro da massa de grãos, provocando correntes de convecção de ar, que criam pontos de alta umidade relativa e alto teor de umidade no grão e, conseqüentemente, pontos com condições ambientais favoráveis ao desenvolvimento de insetos e fungos. Portanto, a aeração exerce uma função essencial tanto para manter a temperatura e a umidade no ponto desejado, quanto para uniformizar e distribuir estes fatores na massa de grãos. Conclui-se portanto que a estabilidade da umidade e temperatura são fundamentais

para o controle preventivo da ocorrência de insetos e fungos. Devido a essas ocorrências, determinar o conteúdo de água nos produtos é muito importante, principalmente em etapas onde a diferença de peso está relacionada com o preço, pois a água é um componente que pode adulterar o peso do produto (Luz, 2002).

O controle da umidade não é indispensável apenas na fase de armazenagem da matéria-prima. Em diversas áreas da indústria, é necessário o controle da umidade dos produtos ou da matéria-prima que será processada em um período de tempo muito curto.

No caso de indústrias alimentícias, quando a umidade ultrapassa um determinado limiar, ocorre perda na produção. Por isso, a medição de umidade deve ocorrer de forma precisa e com rapidez, pois, quanto mais rápido for determinado o excesso de umidade, menos é perdido na produção. Isto é sobretudo verdade na indústria de processamento de grãos.

Grandes empresas exportadoras de grãos e derivados necessitam de um controle minucioso da quantidade de água nos produtos, pois o mercado externo limita essa quantidade para garantir a qualidade dos mesmos. No Brasil, o Ministério da Agricultura definiu o limite máximo de umidade para o farelo de soja em 12,5% (MAPA, 1983) e para o grão de soja em 14% (MAPA, 1993).

Com um processamento anual de 28.756 mil toneladas no ano-safra de 2006/2007, previsão de 30.700 mil toneladas para o ano-safra de 2007/2008 para o complexo de soja (ABIOVE, 2008b) e previsão de crescimento no consumo mundial, estima-se para 2020, uma produção de 105.000 toneladas de soja (Lovatelli, 2005). Neste contexto, a exportação brasileira prevista para o ano de 2008 é de 27.300 mil toneladas de grãos de soja e de 13.100 mil toneladas de farelo de soja a U\$390,00 a tonelada do grão e a U\$300,00 a tonelada do farelo (ABIOVE, 2008a). Assim, a diferença de uma pequena quantidade da porcentagem de umidade pode gerar um prejuízo (ou um lucro) muito grande para o exportador. Se considerar, por exemplo, uma diferença de 1% a menos na quantidade de água do produto, o Brasil teria um prejuízo de 106,47 milhões de dólares somente na exportação da soja em grãos.

O controle da umidade não está relacionado somente com o aumento do lucro, mas com a qualidade do produto, pois, controlando a umidade, pode-se armazenar o produto por um período de tempo maior, garantindo a sua qualidade. Além disso, como a exigência do mercado com a qualidade dos produtos está aumentando a cada dia, um controle mais preciso da umidade garante uma qualidade melhor desses, aumentando a confiabilidade do produto brasileiro no exterior, tendo em vista o crescimento das exportações, já que o consumo de soja tende a aumentar por causa das propriedades nutricionais dessa leguminosa.

Outra área importante onde a medição de umidade é imprescindível é a indústria do café. O café é a segunda bebida mais popular do mundo, sendo que o Brasil é o segundo maior mercado consumidor e detém a posição de maior produtor e exportador mundial de café verde, com faturamento em 2007 de 1,5 bilhão de dólares. Em 2006, o Brasil produziu 42.512 mil sacas (60kg) de café, correspondente a 34,66% da produção mundial, e exportou 27.642 mil

sacas de café (30,10% das exportações mundiais) (ABIC, 2008). A exportação de café em grãos atingiu 25.595 mil sacas de café em 2006, com uma receita de 2,92 bilhões de dolares.

No caso do café, o limite máximo de umidade definido pelo Ministério da Agricultura é de 12,5%, independente de sua classificação, para o café beneficiado grão cru (MAPA, 2003). Com a diferença de 1% a menos na umidade, o prejuízo para o país seria de mais de 29 milhões de dolares.

Em especial, na produção do café, o controle da umidade da matéria prima é fundamental em todos os estágios da linha de produção. Por exemplo, o controle nos grãos verdes é essencial, pois uma bebida de má qualidade implica em restrições comerciais, que podem ir desde a redução do preço comercial a total rejeição do produto pelo mercado consumidor. O café solúvel, por sua vez, pode ser produzido pela secagem do extrato de café torrado a quente (*spray dried*) ou a frio (*freeze dried*). O controle de umidade nesta fase segue especificações que variam de 1,50 a 3,50% de umidade, especificada por cada cliente que exige seu controle dentro da faixa pré-estabelecida. Abaixo de 1,50% de umidade, o produto apresenta-se com sabor queimado e, acima de 3,50%, o mesmo sofre intumescimento na embalagem. Portanto, o controle da umidade no processo de secagem é de vital importância.

Como esse controle ainda é muito precário na maioria das empresas, estas enviam um produto com uma quantidade de água muito abaixo do limite, somente para garantir que o produto não seja recusado pelo comprador, acarretando grandes prejuízos financeiros. Outras empresas alimentícias também precisam de um controle de umidade na sua linha de produção para garantir a qualidade final do produto.

O transdutor apresentado neste trabalho é baseado em sensoriamento de umidade pela identificação da concentração de moléculas de água, utilizando o princípio da absorção/reflexão. Absorção é um processo que envolve a perda de energia da radiação eletromagnética para um meio. Moléculas neste meio absorvem energia, mudam seu estado e tornam-se excitadas, mostrando transições específicas de sua conformação energética. Estas transições fornecem uma "assinatura" do tipo de molécula existente em um determinado meio e, através da observação da diminuição da intensidade do sinal eletromagnético para os comprimentos de onda correlacionados às transições, é possível estimar a concentração destas moléculas. É um processo comum, podendo ocorrer em diferentes meios como sólidos, líquidos ou gases.

O padrão de um espectro de reflexão está relacionado à absorção. A partir disto, desenvolveu-se um transdutor que permite observar a variação da intensidade da radiação eletromagnética incidente sobre um meio na região do comprimento de onda do espectro de absorção da água. Esta variação na intensidade permite avaliar a concentração de água no produto.

## 1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho foi desenvolver um transdutor de umidade por infravermelho que forneça valores de tensão inversamente proporcional a umidade.

O sistema desenvolvido possui as seguintes características: compacto, pois não possui elementos que aquecem e/ou dissipam grande quantidade de calor; não possui componentes móveis, pois são utilizados somente componentes semicondutores em lugar de componentes mecânicos; não apresenta limitação de locais para sua utilização, pois, como não possui partes móveis e possui um controle de temperatura do sistema, pode ser utilizado em locais que vibram e com variações de temperatura; e tem baixo custo, devido à técnica utilizada e às novas tecnologias empregadas, os componentes são mais baratos e eficientes.

Em toda dissertação, para simplificar, o termo "umidade" foi utilizado no lugar do termo "umidade absoluta".

Para facilitar a compreensão, o restante deste trabalho é dividido conforme descrito a seguir.

No capítulo 2, são apresentados os conceitos teóricos necessários para a compreensão das etapas do sistema proposto e seu desenvolvimento.

Já no capítulo 3, são apresentados os circuitos e as técnicas utilizadas na implementação das partes do sistema, separado em blocos funcionais.

No capítulo 4, são apresentados os resultados experimentais e as discussões do sistema.

Finalizando o trabalho, são apresentados no capítulo 5 as conclusões.

---

# FUNDAMENTAÇÕES TEÓRICA

---

Neste capítulo, é discutida a teoria necessária para a compreensão dos métodos utilizados e da técnica proposta no trabalho.

## 2.1 Umidade

A umidade de um produto pode ser definida como a razão entre o peso da água presente e o peso do produto úmido.

Diversos métodos para a determinação da umidade são descritos na literatura, adequando-se àqueles que atendam às necessidades de cada linha de produção (Ferrão, 2000). Tais métodos podem ser classificados como destrutivos e não-destrutivos, e sub-classificados em diretos e indiretos (Luz, 2002; Valentini et al., 1998). Os destrutivos destroem os grãos ou modificam sua estrutura (estes são esmagados, moídos etc.) durante o processo de medição e os não-destrutivos preservam a integridade dos mesmos. Nos métodos diretos, a umidade é calculada, geralmente, pela diferença de peso das amostras no início e ao final do processo. Ou seja, a quantidade de água retirada do produto é medida diretamente (Luz, 2002; Valentini et al., 1998). Já nos métodos indiretos, a umidade é estimada em função da medição de outras propriedades e é determinada matematicamente ou empiricamente (Luz, 2002). Para isto, as propriedades mais utilizadas são a resistência elétrica e a capacitância dos produtos (Valentini et al., 1998).

Dentre os métodos de medição, os métodos destrutivos mais conhecidos são: estufa, destilação e o químico. Dentre os não-destrutivos, podem-se citar o elétrico, o acústico e o de reflectância no infravermelho.

No método destrutivo indireto pela estufa a ar, uma quantidade de produto com peso conhecido é colocado para secar em uma estufa. Assim, a quantidade de umidade será a diferença de peso do produto no início e no final do processo, depois de completamente seco.

Suas principais desvantagens são ser um processo relativamente demorado (24 a 71 horas) e o equipamento necessário ser elaborado e volumoso (Luz, 2002). Contudo, devido ao baixo custo dos materiais envolvidos neste método e a facilidade em se determinar a umidade, ele é definido como o método padrão para medição de umidade em grãos, estabelecido pelo Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (Almeida et al., 2007; Fogaça et al., 2004; Luz et al., 1993; Nery et al., 2004; Pinho et al., 2007; Valentini et al., 1998) e reconhecido internacionalmente pela *International Seed Testing* (ISTA) (Fogaça et al., 2004; Luz et al., 1993; Nelson et al., 2000; Nery et al., 2004).

Para determinar o peso da água nos métodos destrutivos, pesa-se o produto e, em seguida, o mesmo é colocado para secar em uma estufa por um longo período de tempo, até o produto estar completamente seco. Em seguida, pesa-se o produto seco. O cálculo da porcentagem de água na amostra é dado por

$$P_{umidade} = \left( \frac{P_i - P_{seco}}{P_i} \right) \times 100, \quad (2.1)$$

onde

$P_{umidade}$  = Porcentagem de água (umidade);

$P_i$  = Peso inicial da amostra;

$P_{seco}$  = Peso da amostra seca.

Alguns trabalhos questionam a precisão do método de estufa, pois, devido ao longo tempo de exposição do produto a altas temperaturas, outros componentes voláteis da amostra podem ser perdidos e também pode ocorrer a decomposição de proteínas (Fogaça et al., 2004; Garcia-Amoedo e Almeida-Muradian, 2002; Luz et al., 1993).

Apesar das desvantagens, o método de medição de umidade com estufa ainda é utilizado como, por exemplo, em Araújo e Fernandes (2007); Luz et al. (1993); Nery et al. (2004); Valentini et al. (1998). Todavia, geralmente, tal método é empregado apenas como método de referência. Este foi o caso, por exemplo, nos trabalhos de Almeida et al. (2007); Fogaça et al. (2004).

O método da estufa a vácuo difere do anterior na temperatura empregada para a secagem ( $98 - 100^\circ\text{C}$ ) na pressão de 25 mmHg (ou menos) a que a câmara é submetida. A amostra é aquecida e constantemente pesada até que atinja a constância de peso, o que significa que toda água evaporou o que, de acordo com Luz (2002), pode levar cerca de 5 horas .

Conforme descrito em Luz (2002), o método destrutivo direto de destilação com tolueno é um dos métodos oficiais para determinação de umidade de grãos. Neste método, os grãos são

finamente triturados e aquecidos em tolueno, em um equipamento capaz de volatilizar e condensar substâncias. A água condensada é coletada em um recipiente e o tolueno condensado retorna ao frasco em ebulição. A umidade dos grãos é obtida pelo volume de água coletada.

No método destrutivo de Brown-Duvel, são utilizados grãos inteiros de peso conhecido e aquecidos em óleo. A umidade volatilizada é condensada e coletada em uma proveta graduada (Luz, 2002).

Esses métodos de destilação requerem um controle preciso do processo de destilação e da medição em si, assim como equipamentos de laboratório relativamente elaborados. Infelizmente, são métodos demorados.

Dos métodos destrutivos-diretos-químicos, o mais conhecido é o Karl Fischer, por ser um dos mais precisos e exatos para determinação de umidade de grãos, porém é mais dispendioso e requer habilidades analíticas. O método de Karl Fischer é baseado na redução de iodo para  $I_2$  pelo dióxido de enxofre, que só se dá em presença de água (UFPA-ICEN, 2008). Por exemplo, Garcia-Amoedo e Almeida-Muradian (2002) utilizaram o método de Karl Fischer para determinar a umidade, mas utilizaram outro método como referência. Luz et al. (1993); Pinho et al. (2007) utilizaram o método de Karl Fischer para avaliar o método da estufa, devido as características do experimento realizado.

O método não-destrutivo indireto mais usado para operações com grãos e sementes é o elétrico. Eles são razoavelmente precisos, rápidos e os seus resultados são reprodutíveis. As principais desvantagens são que a sua precisão depende da distribuição uniforme da umidade dentro de cada grão, requerendo periódica recalibração e possuem faixa de medição relativamente estreita.

Quanto aos medidores elétricos, existem dois tipos. Os que utilizam a teoria de condutância e os de capacitância. O medidor por condutância (resistência) é baseado na característica elétrica do material que fica pressionado por dois eletrodos e medem a sua resistência elétrica à passagem de uma corrente elétrica. A faixa de trabalho é entre 8% e 22%. Já o medidor por capacitância mede a constante dielétrica da amostra. Sua faixa de trabalho é maior do que o anterior e são menos sujeitos a erros devido a má distribuição da umidade entre os grãos, o que o torna mais prático (Luz, 2002).

A desvantagem dos medidores elétricos é a dificuldade em se manter o equipamento regulado e manter a precisão, pois a composição química do material a ser medido pode afetar a leitura, bem como a temperatura, densidade, forma e dimensões dos grãos, dentre outros fatores. Berbert et al. (2007) utilizaram a técnica por capacitância para determinar o teor de água em sementes de café e o método da estufa para calibrar o equipamento, devido a confiabilidade no método padrão.

O medidor elétrico encontrado com maior facilidade é o de placas paralelas (por seu preço) onde o produto é o dielétrico do capacitor. McIntosh e Casada (2008) mostraram uma alternativa para a técnica das placas paralelas, já Berbert et al. (2007, 1999) utilizaram a técnica de

capacitor de cilindros concêntricos para a medição de umidade *on-line*, utilizando frequências na faixa espectral da região das ondas de rádio, enquanto alguns trabalhos utilizam frequências mais altas (microondas) (Nelson et al., 2000; Trabelsi e Nelson, 2007).

Os métodos não-destrutivos indiretos acústicos são baseados na teoria da medição de diferentes níveis de som produzidos pelos grãos, com diferente quantidade de umidade, quando colidem com uma superfície (Luz, 2002). A desvantagem dessa técnica é o alto nível de ruído ambiente que pode interferir na medição e sua faixa de trabalho de 7% a 17%. Amodeh et al. (2006) utilizaram essa técnica para desenvolver um protótipo de um medidor de umidade *on-line*.

O método não-destrutivo direto de reflectância no infravermelho é baseado na espectrometria, onde uma amostra é irradiada em dois comprimentos de onda diferentes de luz infravermelha. Um comprimento de onda é absorvido pela água enquanto o outro é usado como referência e é muito pouco absorvido (Luz, 2002). Tal método é muito rápido e preciso, porém é muito caro. Vários trabalhos utilizaram esse método para medir a umidade e também outros componentes como, por exemplo, Araujo (2007); Claudio et al. (2006); Lestander (2003); Mesić et al. (2005); Oliveira (2006); Pu et al. (2003), bem como também vários livros (Burns e Ciurczak, 2001; Hudson Jr, 1969; Williams e Norris, 1998).

No presente trabalho, o método escolhido para desenvolver o transdutor proposto foi este último, devido a sua maior gama de utilização nas indústrias (para medição de umidade em tempo real e com maior precisão) e ao alto valor agregado desse equipamento, o que dificulta seu acesso pelas pequenas empresas e agricultores. Tal processo utiliza a técnica de reflexão difusa no infravermelho próximo.

Para entender o método de medição de umidade baseado no princípio da reflectância no infravermelho é necessário compreender algumas características da luz. Por isso, nos próximos itens discute-se alguns conceitos indispensáveis a compreensão deste método.

## 2.2 Radiação Eletromagnética

A luz é uma forma de energia que se propaga e interage com a matéria. É composta por diversas radiações de diferentes comprimentos de onda ( $\lambda$ ).

Quanto à energia transportada pelas ondas, elas são classificadas em dois tipos: as ondas mecânicas e as ondas eletromagnéticas. As ondas mecânicas dependem de um material para se propagarem, enquanto que as ondas eletromagnéticas não dependem de um material e transportam energia. São compostas pelas ondas elétricas e magnéticas, perpendiculares entre si, como representadas na Figura 2.1.

Por causa da variedade da utilização de unidades para representar o comprimento de onda ( $\text{Å}$ ,  $nm$ ,  $\mu m$ ,  $cm$  e  $cm^{-1}$ ) presente na literatura, a unidade utilizada como padrão neste

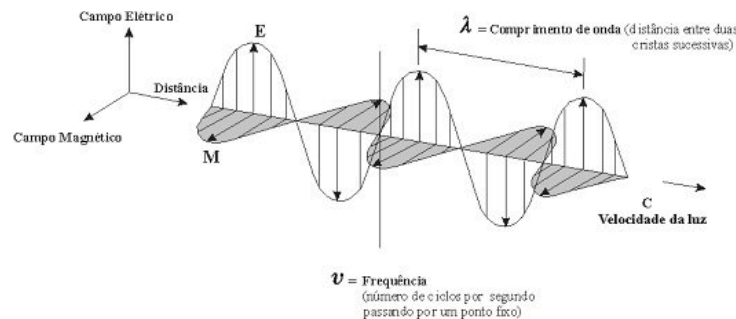
trabalho para o comprimento de onda é o nanômetros ( $nm$ ), que equivale a  $10^{-7}$  centímetros ( $cm$ ). A conversão de comprimento de onda para número de onda é dado por

$$x(cm^{-1}) = \frac{10^7}{\lambda(nm)}. \quad (2.2)$$

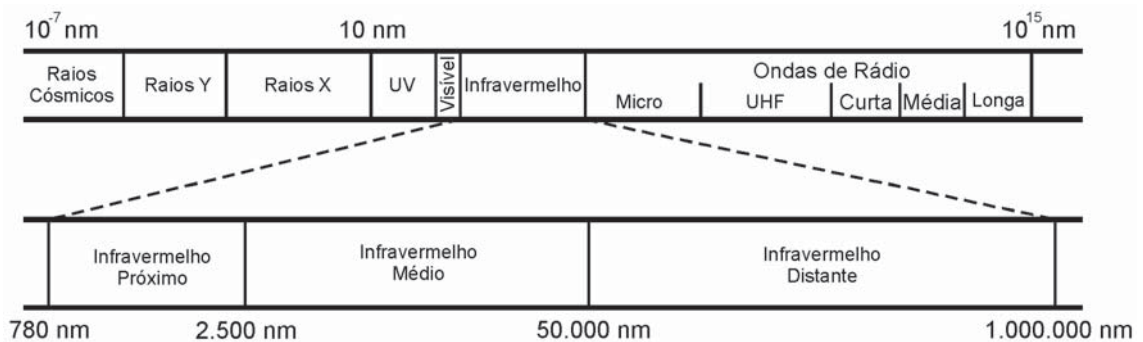
A luz, na forma como todas as pessoas conhecem, é uma gama de comprimentos de onda que sensibiliza o olho humano. Esta faixa de comprimentos de onda visível é muito pequena e limitada de um lado pela radiação ultravioleta e, por outra, pela infravermelha. Embora não seja possível visualizar a radiação infravermelha, ela está presente na luz do sol e em outra fonte de radiação.

### 2.2.1 Radiação Infravermelha

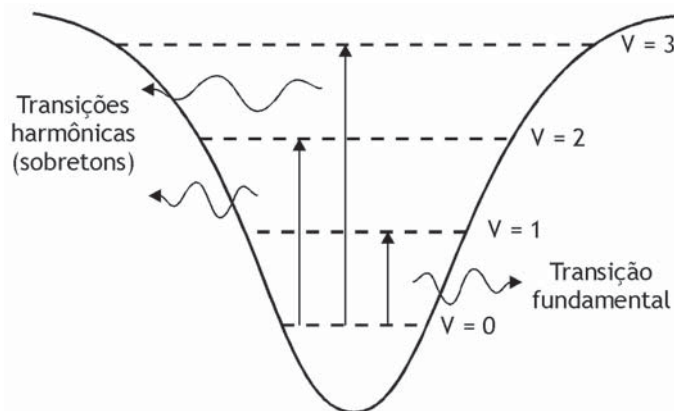
A radiação infravermelha é uma parte da radiação eletromagnética, portanto é uma onda eletromagnética e não necessita de um meio para se propagar. Ela abrange a região de 780 a 1.000.000  $nm$ , sendo limitada de um lado pelo espectro visível (380 a 780  $nm$ ) e de outro lado pela microondas (1.000.000 a 300.000.000  $nm$ ), conforme a Figura 2.2.



**Figura 2.1** – Representação da onda eletromagnética, composta pela onda elétrica e magnética (LABGIS, 2008).



**Figura 2.2** – NIR no espectro eletromagnético.



**Figura 2.3** – Transição entre níveis vibracionais.

A região do infravermelho pode ser subdividida em três regiões, denominadas de Infravermelho Próximo (NIR), que vai de 780 a 2.500  $nm$ , Infravermelho Médio (MIR), de 2.500 a 50.000  $nm$ , e o Infravermelho Distante (FIR), de 50.000 a 1.000.000  $nm$  (Mendham et al., 2002). O comportamento da emissão de luz é diferente para cada região.

Normalmente, as moléculas que compõem uma substância vibram em uma frequência denominada fundamental. Contudo, quando a radiação incide sobre as moléculas, estas são excitadas e a frequência de oscilação é alterada. Tal alteração é chamada de transição e pode ser classificada em três tipos: fundamental, harmônica (ou sobretom) e banda de combinação.

Os sobretoms são bandas com valores de frequência correspondentes aos múltiplos inteiros daqueles das vibrações normais, as harmônicas. Por exemplo, seja  $v$  o valor da frequência de um dado modo normal de vibração, os sobretoms vão aparecer com valores aproximados de  $2v$ ,  $3v$  etc (Luz, 2003).

As bandas de combinação são combinações lineares das frequências normais ou múltiplos inteiros destas, ou seja, correspondem à soma das frequências de seus componentes. Por exemplo, sejam  $v_a$  e  $v_b$  valores de frequência de modos normais de vibração, podem ocorrer as bandas de combinação  $(v_a + v_b)$ ,  $(v_a - v_b)$ ,  $(v_a + 2v_b)$  etc (Luz, 2003).

Enquanto o infravermelho próximo (NIR) caracteriza-se por combinações de harmônicas ou sobretoms ( $v = 0 \rightarrow v = 2, 3 \dots$ ) (780 – 1.400  $nm$ ) e combinações de bandas de vibrações (1.400 – 2.500  $nm$ ), o infravermelho médio (MIR) caracteriza-se por vibrações e rotações fundamentais ( $v = 0 \rightarrow v = 1$ ) (2.500 – 50.000  $nm$ ) e o infravermelho distante (FIR), por rotações (50.000 – 1.000.000  $nm$ ) (Figura 2.3) (Volmer, 2001).

Quando a energia da radiação incidente tem o mesmo valor da diferença de energia entre os dois estados vibracionais ocorre a absorção de energia no infravermelho.

Quando a radiação eletromagnética incide em um material, interage de diversas maneiras, dentre elas, a reflexão. Para partículas com tamanho arbitrário, utiliza-se o espalhamento de Mie. Este só é observado quando o meio, no qual a radiação incide, não é homogêneo.

Este espalhamento foi descrito analiticamente por Mie em 1908, a partir das equações de Maxwell, deduzindo como ondas eletromagnéticas interação com partículas esféricas de raio  $r$  (Yamasoe, 2006).

Pelo supracitado, observando-se como as substâncias refletem/absorvem o infravermelho, é possível analisar a sua composição química.

### **Infravermelho Próximo**

Conforme discutido anteriormente, uma radiação monocromática, ao interagir com uma amostra, poderá ser absorvida, transmitida ou refletida. No caso de alimentos, a maioria é opaco. Assim, a utilização da técnica de reflectância no infravermelho próximo é mais adequada para a análise desses materiais. Entretanto, é possível utilizar o infravermelho próximo em materiais líquidos e com graus de transparências (Osborne, 1981).

Em uma molécula, a vibração dos átomos no seu interior apresenta energia coerente com a região do espectro eletromagnético correspondente ao infravermelho (Luz, 2003). Todavia, a radiação infravermelha não tem energia suficiente para causar transições eletrônicas. A absorção desta radiação é restrita a espécies moleculares que possuem diferenças de energia pequenas entre os estados vibracionais e rotacionais. Para conseguir absorver energia da radiação infravermelha, a molécula precisa sofrer uma variação no movimento vibracional ou rotacional e conseqüentemente uma variação no momento de dipolo (Valderrama, 2005).

Quando uma molécula que possui a propriedade de variação do momento dipolar vibra, uma variação do momento dipolar causa um campo que pode interagir com o campo elétrico associado à radiação. Se a frequência da radiação for exatamente a mesma da frequência vibracional, ocorrerá uma transferência de energia efetiva e, como conseqüência, resultará em absorção de radiação. Moléculas homonuclear como o  $O_2$ ,  $N_2$  ou  $Cl_2$  não podem absorver radiação no infravermelho devido a não possuírem nenhuma variação no momento dipolar (Coates, 1999; Skoog et al., 2002; Valderrama, 2005).

Dependendo da quantidade de energia, existem dois tipos de vibrações moleculares possíveis: os estiramentos e as deformações angulares, ambos de forma simétrica e assimétrica.

Como exemplo de variação do estado vibracional, ilustra-se a molécula de água que possui três graus de liberdade de vibrações (Figura 2.4). Como conseqüência desse comportamento vibracional, as moléculas, quando submetidas a ações de radiações eletromagnéticas, estão sujeitas a desenvolverem uma série de efeitos (absorção, refração, reflexão). Estes efeitos são específicos dos átomos presentes nesta molécula, bem como a região do espectro da radiação envolvida, permitindo assim identificar os seus compostos (Araujo, 2007).

Baseado na discussão anterior, o levantamento de dados químicos e físicos no infravermelho, espectroscopia, é uma ferramenta muito útil para fornecer informações quantitativas a respeito da composição da amostra.

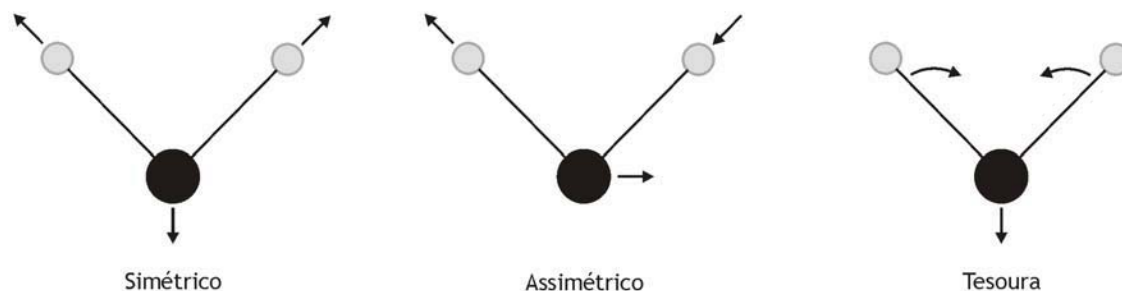


Figura 2.4 – Estados vibracionais para a água.

## 2.2.2 Espectroscopia Infravermelha

Como a luz interage de forma diferente em elementos diferentes, pode-se usar este fenômeno para identificar a composição das substâncias. Tal técnica é chamada espectroscopia. A interação da radiação com a matéria pode causar redirecionamento da radiação e/ou transição entre os níveis de energia dos átomos ou moléculas. A transição de um nível menor para um nível maior com transferência de energia da radiação para o átomo ou molécula é chamado de absorção. A transição de um nível maior para um nível menor é chamado de emissão se a energia é emitida. O redirecionamento da luz por causa da interação com a matéria é chamado de espalhamento e neste pode ou não ocorrer transferência de energia.

## 2.2.3 Determinação da Umidade

Como discutido nas seções anteriores, as moléculas de uma substância sofrem influência da radiação incidente. Em especial, a radiação da luz na região do infravermelho próximo (NIR) interage principalmente com vibrações de sobretons de moléculas polares (ligações covalentes entre átomos pesados e leves: C-H, O-H e N-H) (Lestander, 2003). Os sobretons e bandas de combinações do O-H na água, C-H em carboidratos e N-H em proteínas têm alta absorção de radiação NIR. Similarmente, a dupla ligação do C=O e C=C tem absorção no NIR (Segtnan et al., 2001).

Os espectros de reflectância na região do infravermelho apresentam muitos possíveis índices de absorção da água, porque há várias características de absorção de água na região do infravermelho próximo e distante (Serrano et al., 2000; Sims e Gamon, 2003). Entre os índices de água estão a banda de índices de água (Peñuelas et al., 1993), índice de estresse da água nas ondas curtas do infravermelho (Fensholt e Sandholt, 2003), três bandas de razão dos índices (Pu et al., 2003), espessura equivalente da água (Roberts et al., 1998; Serrano et al., 2000; Sims e Gamon, 2003) e a diferença normalizada do índice de água (Claudio et al., 2006; Gao, 1996; Serrano et al., 2000).

Devido às características moleculares, a água tem alta absorção na região NIR. Existem várias faixas espectrais de absorção da água na região de 780 – 2.500 nm, cujos comprimentos

de ondas centrais para os máximos de absorção da radiação, para a água pura a 20° C, são 970 nm, 1.190 nm, 1.450 nm, 1.940 nm (Curcio e Petty, 1951; Curran, 1989). Estas bandas da água são três bandas de sobretons, o primeiro a 1.450 nm, o segundo a 970 nm e o terceiro a 760 nm e bandas de combinação do alongamento e flexão do O-H para 1.940 nm e 1.190 nm (Lestander, 2003).

Um grande número de pesquisas tem procurado por fórmulas e comprimentos de onda ótimos para mensurar a quantidade de água. No entanto, os dados experimentais obtidos contradizem a teoria, ou seja, tais dados têm tido pouca validação com os dados teóricos (Claudio et al., 2006; Fensholt e Sandholt, 2003; Pu et al., 2003; Serrano et al., 2000; Sims e Gamon, 2003). Conseqüentemente, a busca por uma banda da água ótima ou expressão de reflectância para produzir uma média de *status* de água foram evasivos. Vários estudos sugerem que o comprimento de onda ideal para a previsão do conteúdo de água é o comprimento de onda com coeficiente de absorção fraco que permite que a radiação penetre profundamente nas plantas, fornecendo uma faixa dinâmica apropriada. Por exemplo, recentes estudos têm sugerido que a fraca absorção nas regiões de 970 nm e 1200 nm fornecem bandas de frequência convenientes para monitorar o conteúdo de água das plantas (Serrano et al., 2000; Sims e Gamon, 2003) (Claudio et al., 2006).

Peñuelas et al. (1993, 1996) estudaram a reflectância da gerbera, pimenta, e plantas de feijão e trigo na região de 950–970 nm como um indicador de *status* da água. Seus resultados mostraram que a relação da reflectância em 970 nm, uma das bandas de absorção da água, para a reflectância em 900 nm, como comprimento de onda de referência ( $R_{970}/R_{900}$ ), está relacionado com o potencial de água na folha, condutância estomatal e elasticidade da parede celular (Pu et al., 2003).

O índice da banda de água é calculado como  $R_{900}/R_{970}$ , onde  $R_x$  é a reflectância para um dado comprimento de onda e a largura da banda é tipicamente 10 nm. Este índice, que utiliza a razão  $R_{900}$  e  $R_{970}$ , foi primeiramente introduzido como um índice de água da planta por Peñuelas et al. (1993). Estudos passados revelaram que tal índice é um bom indicador de conteúdo de água em tecidos finos das plantas (Sims e Gamon, 2003), particularmente em folhas verdes (Peñuelas et al., 1993). Outros estudos (Mo et al., 2004; Zarco-Tejada et al., 2003) indicaram que também é possível modelar o equilíbrio de água e o conteúdo através de dados de reflectância.

### 2.3 Fontes de Emissão de Infravermelho

Para o infravermelho existem várias fontes de emissão de radiação com suas vantagens e desvantagens.

A fonte de Nernst é composta de óxidos de terras raras com o formato de um cilindro oco, diâmetro de 1 a 2 mm e comprimento de cerca de 20 mm. Terminais de platina são

fixados às extremidades do cilindro para permitir o contato elétrico, o que acaba sendo um elemento resistivo de aquecimento. Quando a corrente passa pelo dispositivo, são produzidas temperaturas entre 1.200 e 2.200  $K$ .

Outra fonte de infravermelho é o Globar. Um Globar é uma barra de carbeto de silício, normalmente com 50  $mm$  de comprimento e 5  $mm$  de diâmetro, que é aquecida eletricamente entre 1.300 e 1.500  $K$ . As energias espectrais do Globar e da fonte de Nernst são comparáveis, exceto na região abaixo de 5.000  $nm$ , onde um Globar fornece uma saída significativamente maior, mas necessita de resfriamento por água para evitar a formação de arcos.

O arco de Mercúrio é uma fonte de emissão para a região do espectro do infravermelho distante. Nenhuma das fontes provê potência radiante suficiente para uma detecção conveniente como um arco de mercúrio de alta pressão. Esse dispositivo consiste de um tubo encapsulado em quartzo contendo vapor de mercúrio a uma pressão maior que uma atmosfera. A passagem de eletricidade pelo vapor forma uma fonte interna de plasma que fornece radiação contínua na região do infravermelho distante.

A lâmpada de filamento de Tungstênio é a fonte de emissão de infravermelho mais comumente encontrada. Uma lâmpada comum de filamento de tungstênio é uma fonte conveniente para a região do infravermelho próximo, de 780 a 2.500  $nm$ ).

O laser de dióxido de carbono é um laser sintonizável usado como fonte infravermelha, para monitorar as concentrações de certos poluentes atmosféricos e para determinar espécies absorvedoras em soluções aquosas. Um laser de  $CO_2$  produz uma banda de radiação no intervalo de 9.000 a 11.000  $nm$ , sendo útil para a determinação quantitativa de uma série de espécies importantes, como amônia, butadieno, benzeno, etanol, dióxido de nitrogênio e tricloroetileno.

Uma fonte de filamento incandescente é uma fonte de intensidade um tanto menor, mas de vida mais longa que o Globar e a fonte de Nernst. Ela é formada por uma espiral de níquel-cromo enrolada estreitamente e aquecida a cerca de 1.100  $K$  por uma corrente elétrica.

O LED é uma fonte de emissão com comprimento de onda específico, e largura de banda muito pequena, mas possui as vantagens de não aquecer e tempo de vida útil maior, devido a sua característica construtiva (semicondutor). É relativamente novo, comparado com o tempo de utilização das demais fontes de emissão infravermelha. Devido as características citadas serem muito úteis para a aplicação no presente trabalho, esta foi a fonte de infravermelho escolhida para a implementação.

## 2.4 Receptores de Infravermelho

Os transdutores para o infravermelho são classificados em três tipos gerais: os transdutores térmicos, os piroelétricos e os fotocondutores.

Os transdutores térmicos, cujas respostas dependem do efeito de aquecimento da radiação, são utilizados para a detecção de todos os comprimentos de onda no infravermelho, exceto os menores. Com esses dispositivos, a radiação é absorvida por um pequeno corpo negro e o aumento de temperatura resultante é medido. O problema de se medir radiação infravermelha por meios térmicos é complicado pelo ruído térmico do ambiente. Por esse motivo, os transdutores térmicos são encapsulados sob vácuo e cuidadosamente isolados da radiação térmica emitida por outros objetos próximos. São comumente encontrados em fotômetros e espectrofotômetros dispersivos.

Os transdutores piroelétricos são constituídos de folhas de monocristais de materiais piroelétricos que são isolantes (materiais dielétricos) com propriedades térmicas e elétricas muito especiais. Os transdutores piroelétricos têm tempo de resposta rápido o suficiente para seguir as variações no domínio do tempo do sinal de um interferômetro. Por esse motivo, muitos espectrômetros infravermelhos com transformada de Fourier usam esse tipo de transdutor.

Já os transdutores fotocondutores consistem na absorção da radiação pelos materiais componentes do transdutor. Essa absorção promove elétrons não-condutores de valência a um estado condutor de energia mais elevada, reduzindo a resistência elétrica do semicondutor. A composição dos materiais componentes do transdutor varia de acordo com a região NIR/MID/FIR. Esse tipo de transdutor é encontrado em instrumentos multiplexados com transformada de Fourier (Skoog et al., 2002; Valderrama, 2005).

Os transdutores fotocondutores para infravermelho consistem em um filme fino de material semicondutor, como sulfeto de chumbo, telureto de cádmio/mercúrio ou antimoneto de índio, depositado sobre uma superfície não-condutora de vidro e selada em recipiente evacuado para proteger o semicondutor da atmosfera, onde há a absorção da radiação pelos materiais componentes do transdutor. O fotocondutor de sulfeto de chumbo (PbS) é o transdutor mais usado para a região espectral do infravermelho próximo. Pode ser operado à temperatura ambiente. Para radiação do infravermelho médio ou distante, transdutores de telureto de mercúrio/cádmio são usados, oferecendo características de resposta superiores aos dos transdutores piroelétricos, por isso seu amplo uso em espectrômetros com transformada de Fourier.

Os modelos de sensores mais utilizados para a região do infravermelho são os baseados em sulfeto de chumbo (PbS), com faixa de trabalho de  $1.100 - 2.500nm$ , os baseados em índio gálio arsênio (InGaAs), com faixa de  $900 - 1.800nm$  e com respostas mais rápidas, e o de silício (Si), com faixa de  $360 - 1.050nm$ .

## 2.5 Componentes Ópticos

Os componentes ópticos utilizados na maioria dos medidores de umidade são: os filtros ópticos, as lentes e os espelhos.

Os filtros são componentes ópticos que separam diferentes partes do espectro eletromagnético por absorção ou reflexão de certos comprimentos de onda e transmitem outros. Estes podem ser classificados em filtros coloridos e filtros de interferência.

Os filtros coloridos são substratos de vidro contendo espécies que absorvem certos comprimentos de onda. Pode-se citar o filtro colorido passa-alta (*cut-on*) que bloqueia comprimentos de onda curtos e transmite os comprimentos de onda longos. Por outro lado, os filtros de interferência são feitos de múltiplos filmes finos de dielétricos em um substrato. É utilizada a interferência para selecionar a transmissão ou reflexão de determinada faixa de comprimento de onda. Por exemplo, o filtro de interferência passa-banda que transmite uma pequena faixa de comprimento de onda e pode isolar uma simples faixa de emissão de uma lâmpada.

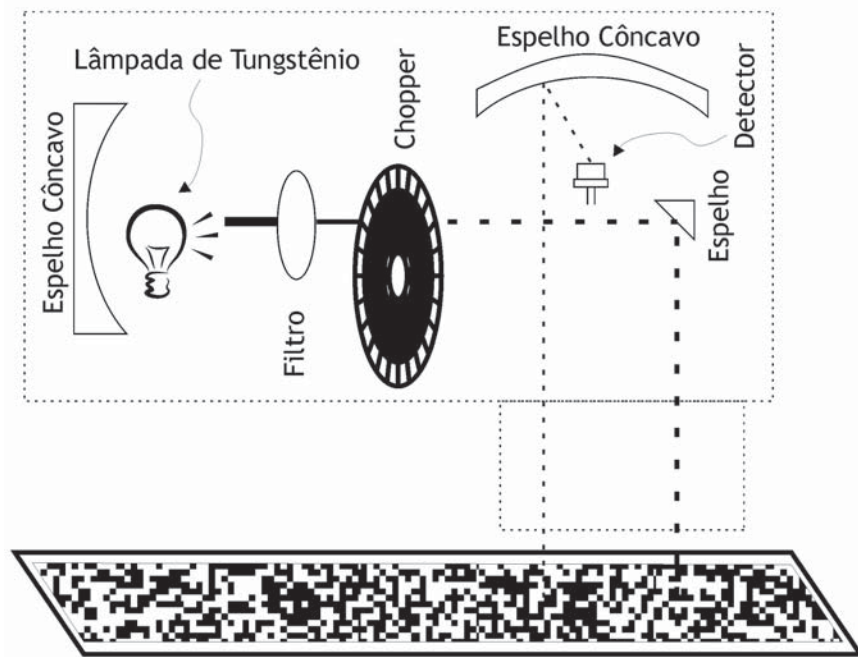
As lentes são componentes ópticos transparentes que são usadas para focar ou colimar a radiação eletromagnética. Para o uso específico na região do infravermelho, são produzidas em  $\text{CaF}_2$  e  $\text{ZnSe}$ , e, para o infravermelho próximo, são produzidas em vidro ou safira.

Os espelhos são materiais para refletir a radiação em uma outra direção ou para focar em um determinado ponto (ponto próximo ou no infinito). De acordo com a região de radiação da luz, os espelhos são fabricados a partir de diferentes materiais. Para refletirem na região do infravermelho, são fabricados em cobre ou ouro; já na região do infravermelho próximo, são fabricados em ouro ou alumínio.

## 2.6 Medidores *On-line* de Umidade Existentes

Dentre os vários sistemas de medição *on-line* de umidade, os mais utilizados são os por ultra-som e os por infravermelho. A técnica do medidor de ultra-som utiliza a metodologia dos sistemas capacitivos com o diferencial de utilizar frequências na faixa do ultra-som. Essa técnica possui a vantagem de ser rápida, relativamente barata e não tão complexa, mas não pode ser utilizado em uma linha de produção com velocidade muito alta, nem em esteiras, pois, para poder medir a umidade, seus sensores devem ficar em lados opostos e as amostras devem ocupar todo o espaço entre eles. Já os medidores que utilizam a técnica de infravermelho, são baseados na técnica de reflectância difusa. A vantagem é de ser muito rápido e de não necessitar de outro aparato na extremidade oposta do medidor, podendo ser utilizado em esteiras na linha de produção. A desvantagem dos medidores por infravermelho existentes é a interferência de fontes que emitem radiação infravermelha.

Dentre os equipamentos *on-line* por infravermelho, os mais conhecidos utilizam a configuração de reflexão difusa. Os equipamentos mais simples (Figura 2.5) utilizam uma lâmpada de tungstênio para emitir a radiação infravermelha, um filtro para selecionar o comprimento de onda desejado, um sistema para transformar a luz contínua em uma luz pulsada (obturador eletromecânico, também conhecido como *chopper*) - para facilitar a eliminação de interferências - e um espelho côncavo para focar a radiação refletida. As desvantagens deste sistema



**Figura 2.5** – Equipamento simples (feixe simples e um único filtro).

são: o aquecimento gerado pela lâmpada incandescente; as partes móveis do *chopper*, que impossibilitam a utilização do equipamento em movimento e a fixação em locais que apresentem vibrações; o filtro para selecionar o comprimento de onda desejado, que eleva o custo do equipamento; e a utilização de apenas um feixe de radiação, que impossibilita a utilização do equipamento em locais com interferência de radiações infravermelha.

Outros equipamentos, que também podem ser utilizados para detecção de outros elementos, utilizam um disco de filtros onde podem ser fixados vários filtros para selecionar diversos comprimentos de onda (Figura 2.6). Estes equipamentos possuem as mesmas desvantagens descritas no equipamento anterior e ainda apresentam mais um elemento móvel (disco de filtros), que aumenta o número de peças móveis para manutenções.

Equipamentos mais complexos utilizam dois feixes de infravermelho, uma para medição e outro para referência (Figura 2.7). Alguns apresentam também o disco de filtros para detecção de mais elementos. As desvantagens destes equipamentos são as mesmas dos citados anteriormente, mas não possuem o problema de interferência de radiações infravermelha. Além disso, todas as topologias citadas não possuem um controle rígido da temperatura. Como os sistemas ópticos são muito sensíveis a variação de temperatura, principalmente o sensor, a falta deste controle impossibilita a utilização em ambientes com ampla variações de temperaturas.

As vantagens desses equipamentos são a velocidade de medição (tempo real) e a alta precisão das medições (na ordem de 0,1%, dependendo da material a ser medido), mas possuem desvantagens de sofrerem muita interferência de fontes emissoras de radiação infravermelha

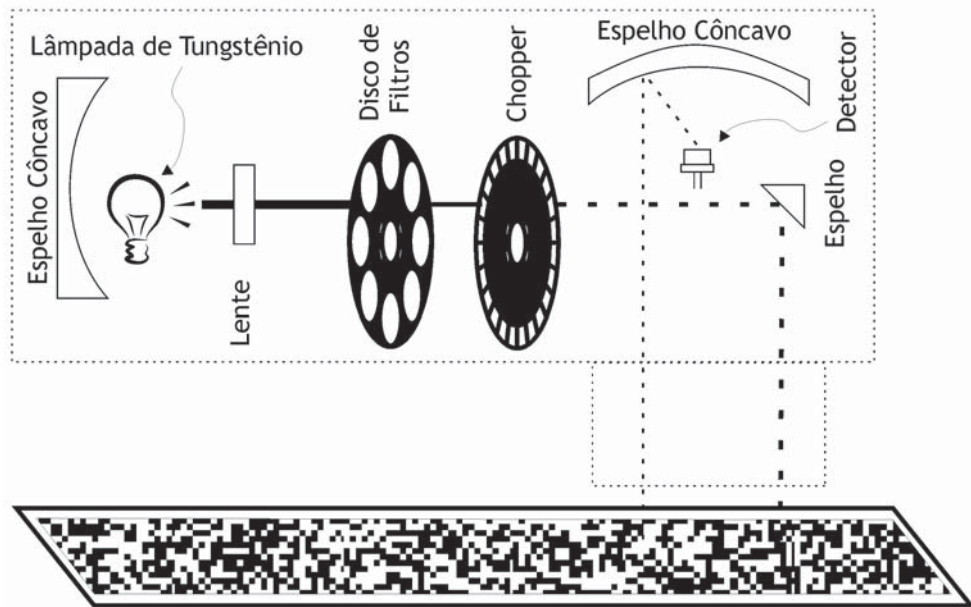


Figura 2.6 – Equipamento com vários filtros.

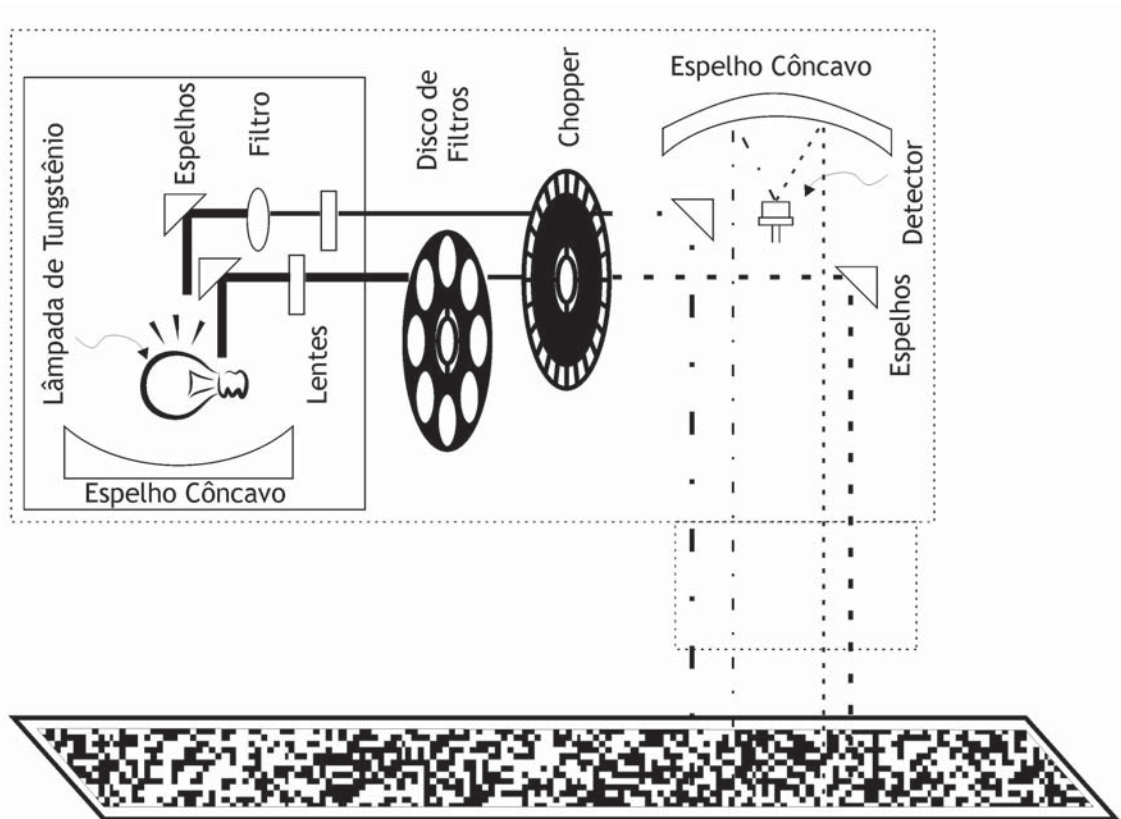


Figura 2.7 – Equipamento com dois feixes NIR.

(luz do sol, lâmpadas incandescentes etc), serem muito grandes (devido ao aquecimento da lâmpada incandescente no seu interior é necessário um sistema de resfriamento), não serem indicados na utilização em locais que apresentam muitas trepidações/vibrações (devido as partes móveis no seu interior) e custo elevado (preço dos filtros muito alto).

Em vista dos problemas e desvantagens existentes nos equipamentos comercializados no Brasil, desenvolveu-se um sistema para solucionar essas limitações, que está descrito no capítulo a seguir.

---

# MATERIAIS E MÉTODOS

---

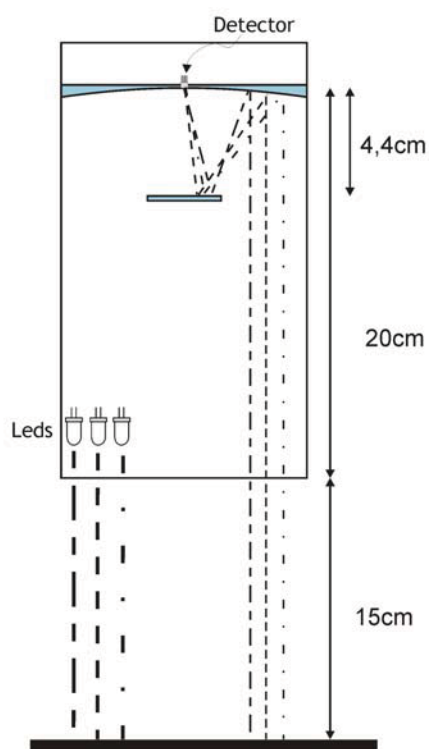
Neste capítulo, são discutidas as características do sistema proposto. Também, são apresentados alguns resultados parciais.

## 3.1 Sistema Proposto

O sistema proposto utiliza LEDs para emitir a radiação infravermelha nos comprimentos de onda para a absorção da água, que incide sobre as amostras e é absorvido pelas moléculas de água. A radiação que não é absorvida pela água é refletida difusamente e colimada por um espelho côncavo que concentra estas radiações em um espelho plano localizado a três centímetros da distância focal do espelho côncavo. Este espelho plano reflete a radiação concentrada para o sensor óptico. Tal sensor está localizado no centro do espelho côncavo onde pode-se fixar uma placa para transmissão do calor do sensor para um elemento Peltier e um dissipador para controle da temperatura do sistema óptico, como ilustrado na Figura 3.1.

Conforme apresentado anteriormente, o sistema proposto utiliza LEDs para substituição da fonte de emissão de radiação infravermelha, que, no caso dos equipamentos existentes, utilizam lâmpadas incandescentes. A utilização dos LEDs, como visto no capítulo anterior, possui a vantagem de não radiar calor, portanto, resolve o problema do aquecimento causado pelas lâmpadas, diminuindo o tamanho e aumentando a vida útil do equipamento, já que a lâmpada possui vida útil menor. Uma outra vantagem da utilização dos LEDs é a possibilidade de modulação da radiação emitida, não necessitando de um obturador mecânico (*chopper*), resolve-se o problema das partes móveis e, conseqüentemente, a limitação de fixação em locais onde possuem vibrações.

Devido ao semicondutor emissor de luz apresentar a característica de largura de banda muito estreita, não é necessária a utilização de filtros para selecionar o comprimento de onda desejado (permitindo a seleção de um determinado comprimento de onda), com ângulo de



**Figura 3.1** – Equipamento proposto.

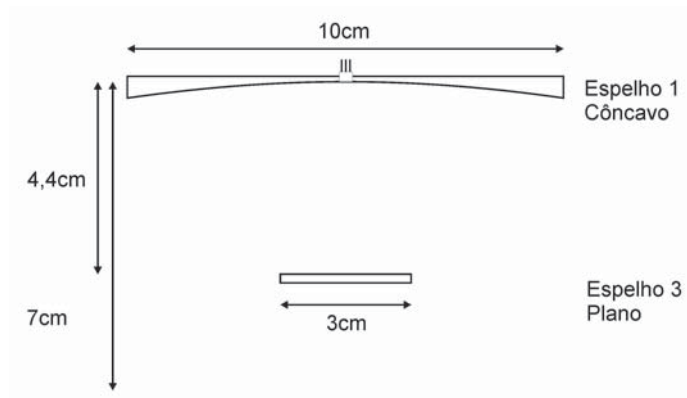
abertura pequeno (concentrando a radiação emitida), o que permite uma redução no custo do equipamento.

Com a redução do custo, pode-se melhorar a precisão do sistema e a imunidade a interferências luminosas, utilizando mais de um comprimento de onda que caracteriza a água e também de uma faixa de referência. Foram utilizados três comprimentos de onda para a absorção da água: a primeira em  $970\text{ nm}$ , a segunda em  $1200\text{ nm}$  e a terceira em  $1450\text{ nm}$ .

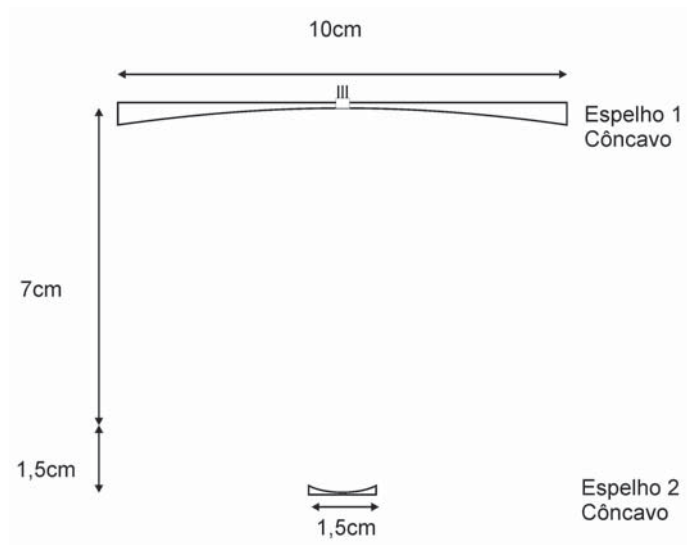
Para melhorar a sensibilidade do sistema e diminuir o tamanho do equipamento, é utilizado um arranjo de espelhos, como na Figura 3.2. Tal arranjo permite também a fixação do sensor em um dissipador para a troca de calor e controle da temperatura, sem atrapalhar o caminho da radiação refletida. Para melhorar ainda mais a sensibilidade, o receptor escolhido foi o fotodiodo de InGaAs.

No arranjo, é utilizado um espelho côncavo (Espelho 1) com diâmetro de  $10\text{ cm}$  e distância focal de  $7\text{ cm}$  e um espelho plano (Espelho 3) com diâmetro de  $3\text{ cm}$ . Pode-se utilizar outras opções de espelhos no lugar do espelho plano como, por exemplo, um outro espelho côncavo com diâmetro de  $1,5\text{ cm}$  e distância focal de  $1,5\text{ cm}$  ou até mesmo um espelho convexo com diâmetro e distância focal com mesmas dimensões do anterior. Estas opções podem ser visualizadas nas Figuras 3.3 e 3.4 respectivamente.

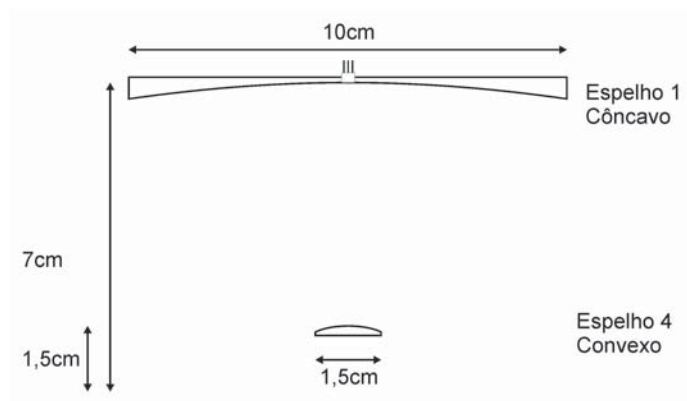
Foi decidido a utilização do espelho plano por causa de seu custo menor e pelo arranjo apresentar uma menor distância entre os espelhos, que diminui ainda mais o tamanho do



**Figura 3.2** – Arranjo de espelhos para concentrar a radiação (espelho plano).



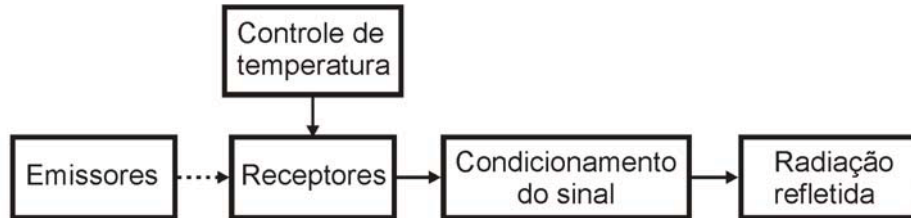
**Figura 3.3** – Arranjo de espelhos para concentrar a radiação (espelho côncavo).



**Figura 3.4** – Arranjo de espelhos para concentrar a radiação (espelho convexo).

equipamento.

Para facilitar o entendimento do sistema proposto, dividiu-se nas seguintes etapas, como ilustrado na Figura 3.5.



**Figura 3.5** – Diagrama dos blocos funcionais do sistema.

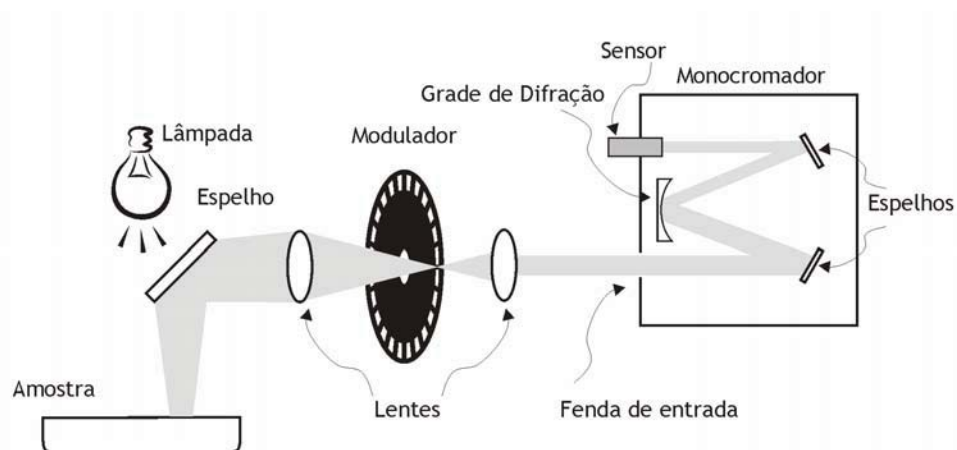
## 3.2 Circuitos dos Emissores

Para poder definir as faixas de radiação desejadas, além do conceito teórico sobre absorção no infravermelho próximo, foram realizadas várias práticas no Laboratório de Óptica do Departamento de Física da Universidade Estadual de Londrina para comprovar quais as melhores faixas para serem utilizadas. Tais experimentos não podem ser utilizados para avaliar a exatidão do método proposto. Isto porque foram utilizados emissores e receptores diferentes aos da proposta. Os resultados servem apenas para validar o método e examinar as regiões de máxima absorção do infravermelho pelas moléculas de água.

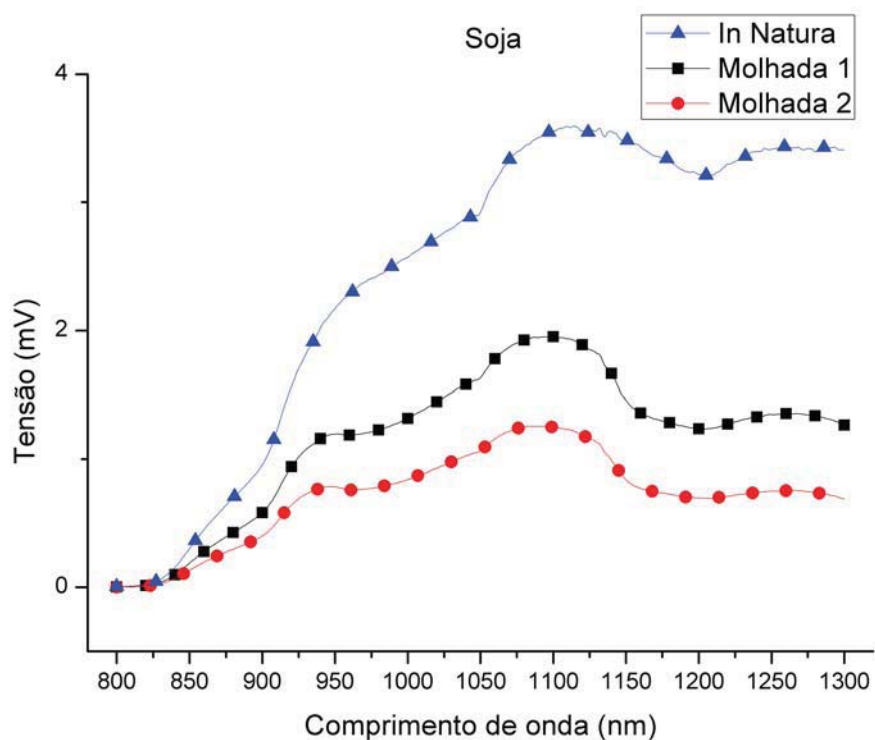
Foi montada, no laboratório de Óptica, a configuração ilustrada na Figura 3.6. Nesta, a lâmpada emite a radiação infravermelha em diversos comprimentos de onda, que é refletida pela amostra e captada pelo espelho. Em seguida, a lente faz o foco para poder atravessar pelo modulador (*chopper*) e por outra lente para focar a radiação na fenda do monocromador. O monocromador realiza a varredura dos comprimentos de onda da radiação incidente através de uma grade de difração interna e reflete somente o comprimento de onda desejado para o sensor. Este converte a radiação incidente em sinal elétrico, que é amplificada por um amplificador *Lock-in*.

Foi realizado este experimento com diversos materiais, como: soja, aveia e milho. Inicialmente, foi separada uma quantidade dessas amostras para a análise, apenas para verificar o comportamento diante a radiação infravermelha.

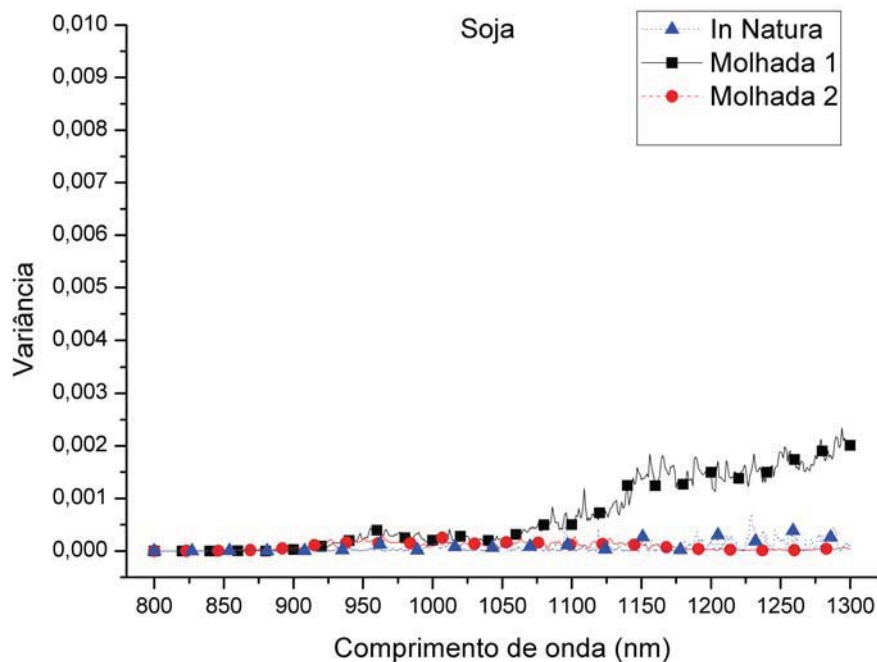
Separou-se uma amostra da soja *in-natura* (umidade ambiente) e foram realizadas várias medições. Em seguida, molhou-se, através de um borrifador, a amostra para realizar novas medições. Para finalizar, molhou-se novamente a amostra para realizar outras medições. A média dos resultados dessas medições, com a variação da tensão de acordo com a variação da umidade na amostra, é mostrada na Figura 3.7. Pode-se perceber a repetibilidade das leituras na Figura 3.8, que demonstra a variância das medidas repetidas.



**Figura 3.6** – Configuração montada para especificar os comprimentos de onda.



**Figura 3.7** – Gráfico das medições com a soja.



**Figura 3.8** – Gráfico das variâncias das medidas.

O mesmo procedimento foi realizado com a aveia e os resultados podem ser visualizados na Figura 3.9.

Em outro experimento, os materiais foram colocados para secar em estufa por mais de doze horas. No momento do experimento, as amostras foram umedecidas e pesadas utilizando uma balança de precisão e, através da fórmula (2.1), foi definida a umidade das amostras.

Como demonstrado a seguir, todos os materiais apresentaram um bom comportamento para o infravermelho, de acordo com o esperado. Também, uma “boa” repetibilidade nas medições foi observada.

No caso da soja (farelo de soja), mediu-se a amostra totalmente seca e depois de umidificada (Figura 3.10). Os comprimentos de onda de interesse (970 nm, 1200 nm e 1450 nm) estão representados nas Figuras 3.11, 3.12 e 3.13 respectivamente.

Para a aveia, foram realizadas as mesmas medições feitas para a soja e uma medição com uma quantidade muito grande de umidade (Figura 3.14), para verificar o comportamento da curva. Observou-se que, devido ao longo tempo de leitura e a baixa umidade da amostra, esta deve ter absorvido umidade do ambiente, pois houve um pequeno aumento na variância, como pode ser visto na Figura 3.15.

As medições para o milho, nesta mesma faixa, são apresentadas na Figura 3.16. Para este gráfico, não foram realizadas várias medições. Este gráfico tem como objetivo apenas verifi-

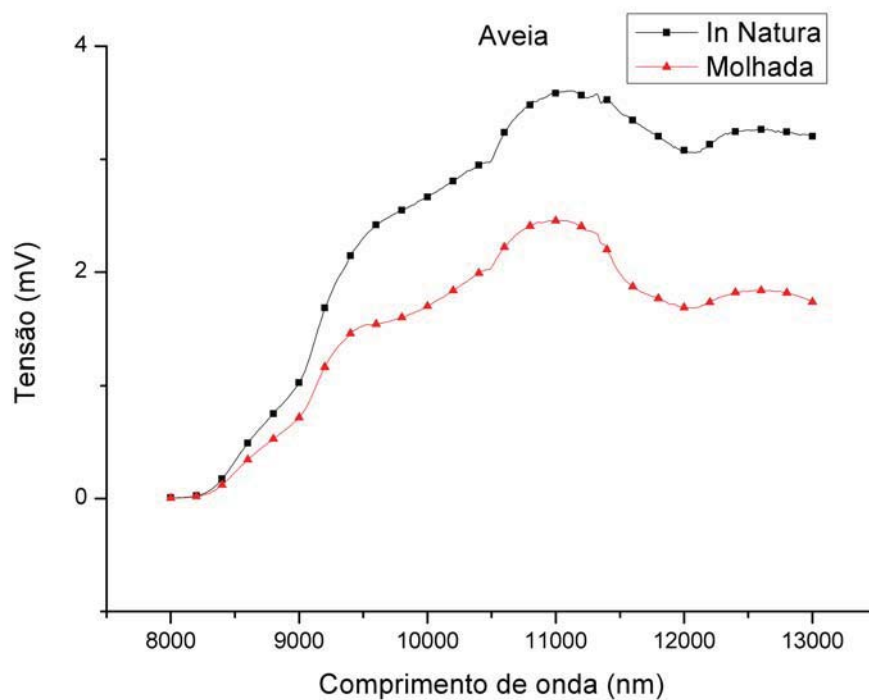


Figura 3.9 – Gráfico das medições com a aveia.

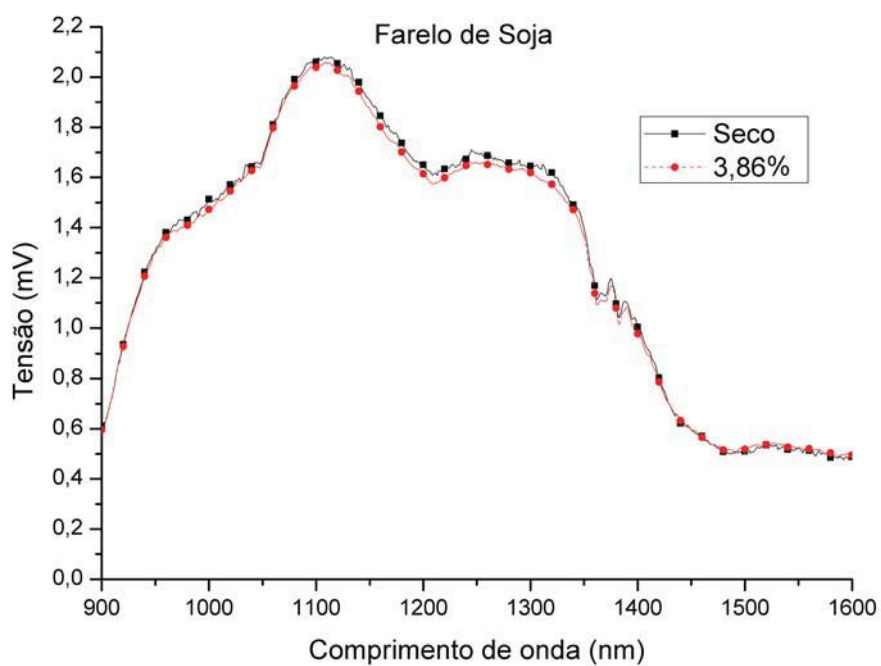
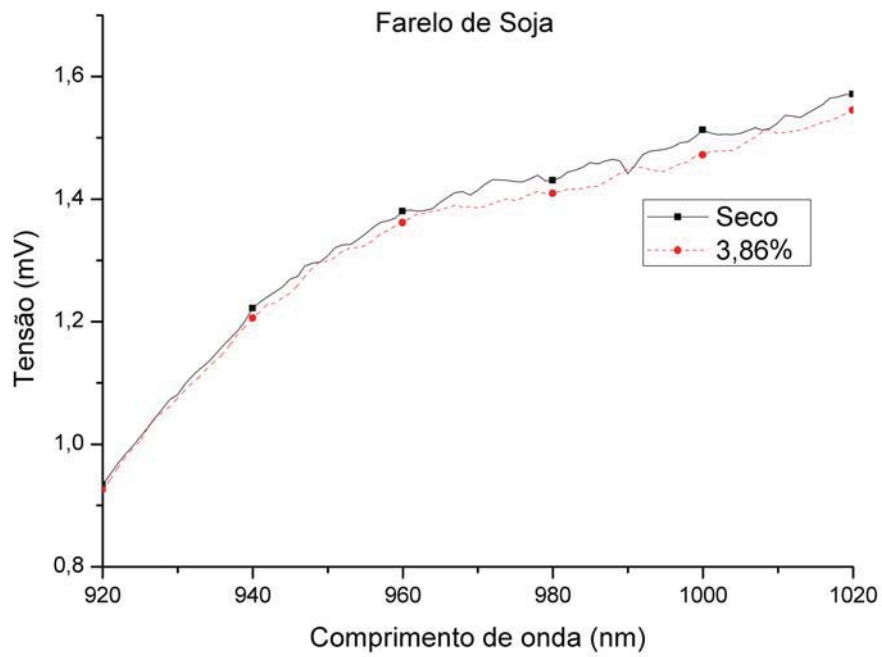
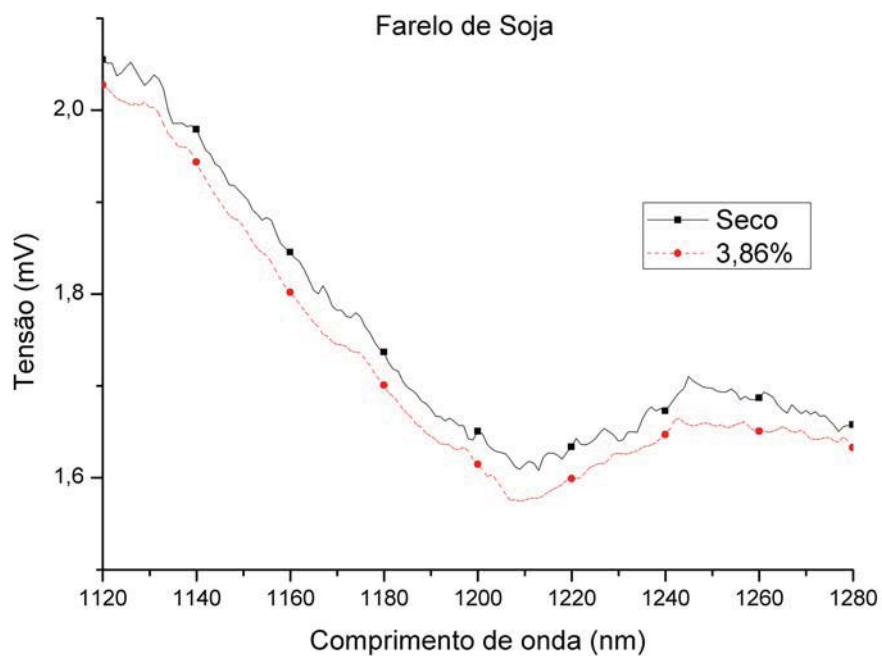


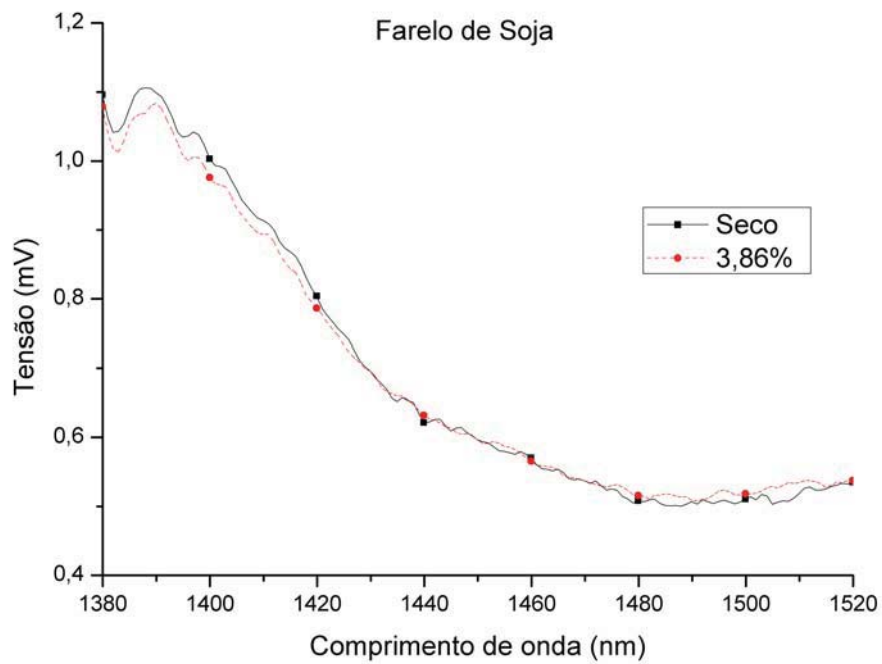
Figura 3.10 – Gráfico das medições do farelo de soja seco em estufa.



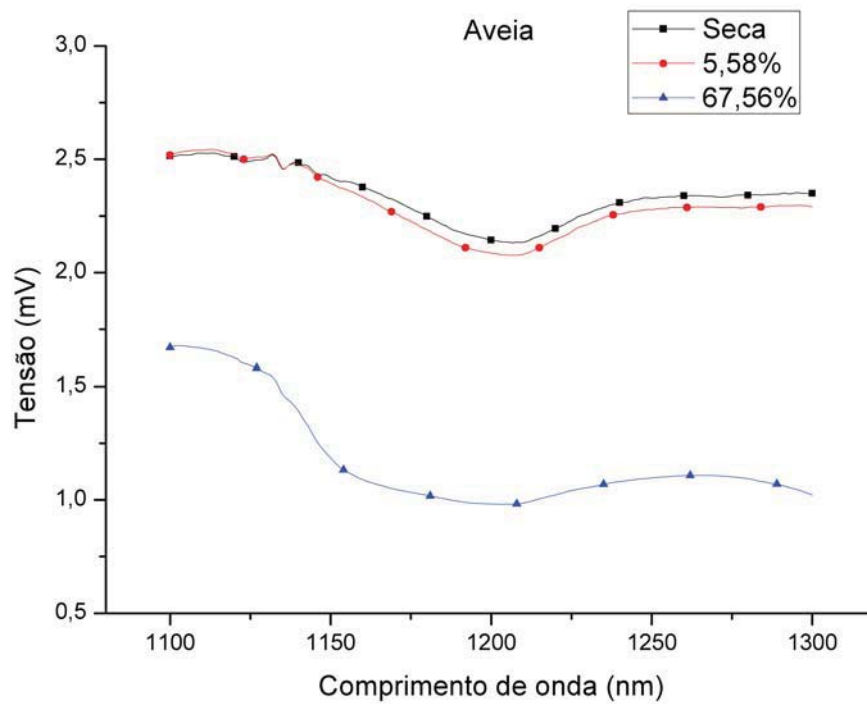
**Figura 3.11** – Medições do farelo de soja seco em estufa na faixa de 970 nm.



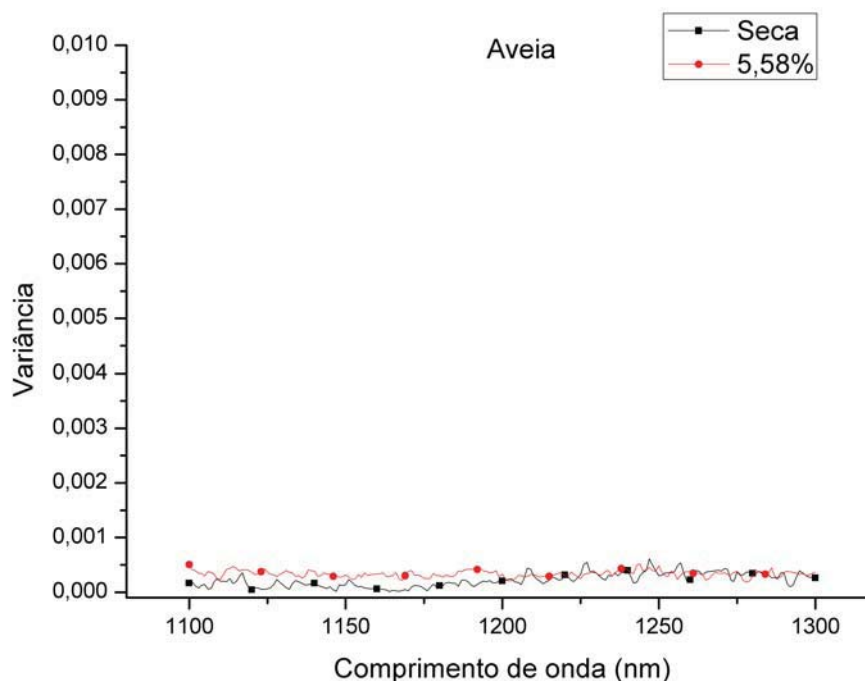
**Figura 3.12** – Medições do farelo de soja seco em estufa na faixa de 1200 nm.



**Figura 3.13** – Medições do farelo de soja seco em estufa na faixa de 1450 nm.



**Figura 3.14** – Gráfico das medições na primeira amostra de aveia.



**Figura 3.15** – Gráfico das variâncias das medidas da aveia.

car o comportamento da curva, comprovando a sensibilidade da metodologia para diferentes materiais.

Após a análise dos resultados obtidos em laboratório, a conclusão foi de utilizar inicialmente três comprimentos de onda de absorção da água para garantir uma melhor precisão nas medidas (970 nm, 1200 nm e 1450 nm).

Como é utilizada mais de uma faixa de radiação e cada LED é responsável pela emissão da faixa específica, para o circuito não ficar dependente das características de somente um fabricante deste semiconductor, foi necessário um circuito que permita um ajuste na corrente de alimentação de cada emissor para que seja possível a regulagem da intensidade independente da potência de emissão de cada LED, permitindo a substituição, independente de fabricante e permitindo uma gama maior de opções no momento de sua aquisição.

O circuito dos emissores é mostrado na figura 3.17. Para facilitar o entendimento do circuito, este foi dividido em três etapas. A primeira etapa é o dreno de corrente. A segunda etapa é o par diferencial e a terceira etapa é o *driver* de acionamento do circuito, que será ativado com uma entrada TTL (0V ou 5V) inversora.

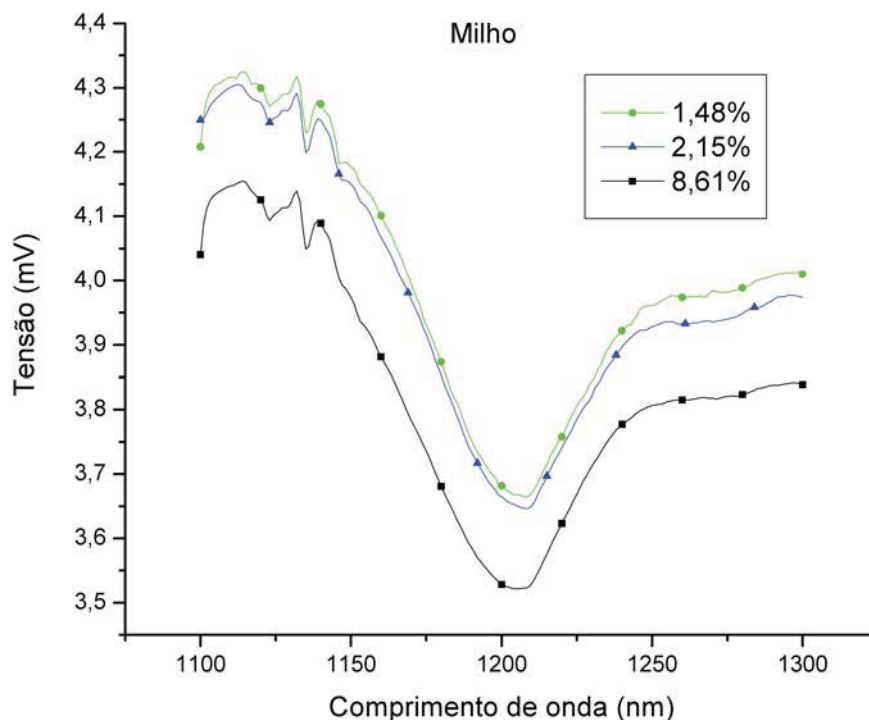


Figura 3.16 – Gráfico das medições na amostra de milho.

### 3.2.1 Dreno de corrente

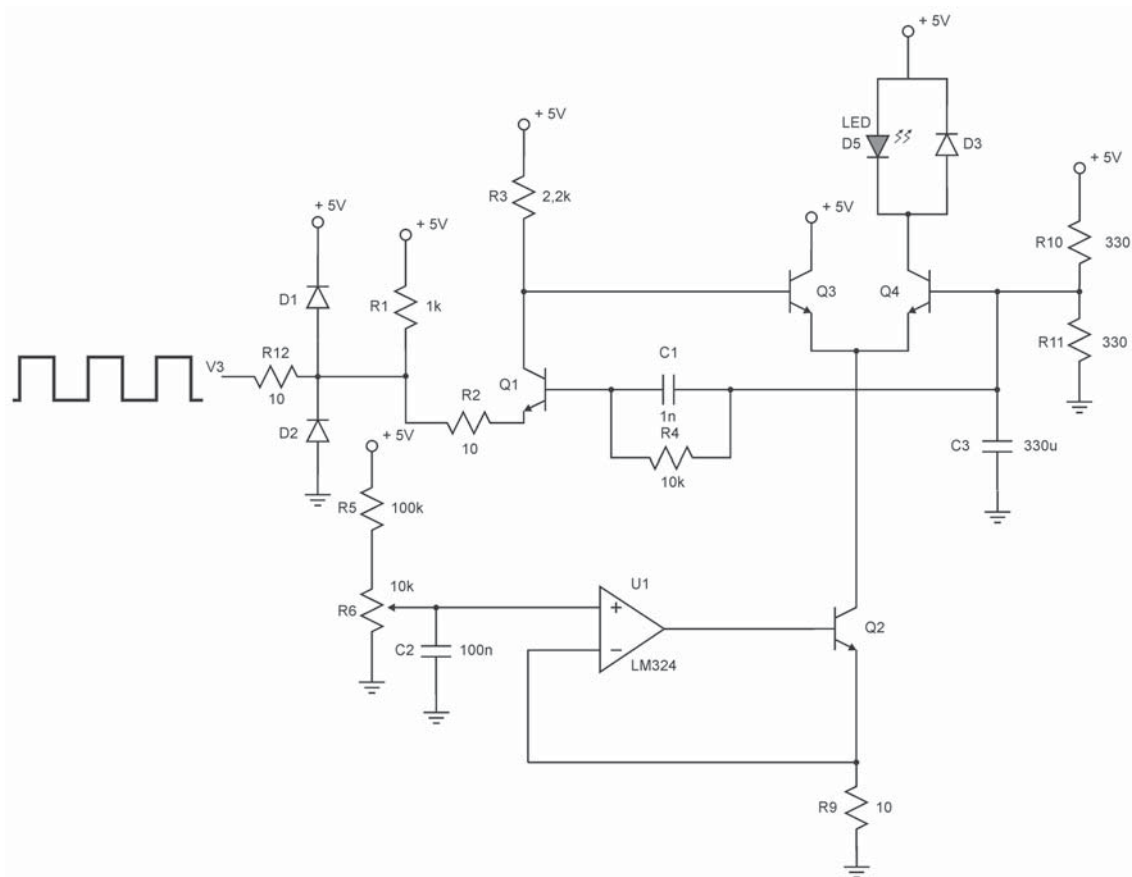
O dreno de corrente estabelece a corrente sobre o LED. A tensão na entrada não-inversora é a referência para o amplificador operacional (amp-op). Pelo curto-circuito virtual, o emissor de Q2 mantém a mesma tensão da entrada não-inversora, definindo a corrente através de R9. Como a entrada inversora tem impedância infinita, não há diferença entre a corrente do emissor de Q2 e a corrente em R9. Portanto, a tensão em R6 vai definir a corrente em R9, que será a mesma corrente do emissor de Q2.

O capacitor C2 é usado para reduzir os picos de ruídos na entrada não-inversora do amp-op. Caso exista ruído na saída, pode-se colocar um capacitor pequeno entre a entrada inversora e o terra.

### 3.2.2 Par diferencial

Os transistores Q3 e Q4 são conectados como par diferencial. Os emissores fornecem toda a corrente para Q2. O transistor que tiver a tensão de base maior, será responsável pelo fornecimento de toda a corrente para Q2.

Quando a tensão de base de Q3 é maior que a tensão de base de Q4, a corrente fornecida



**Figura 3.17** – Circuito de acionamento dos emissores (LED).

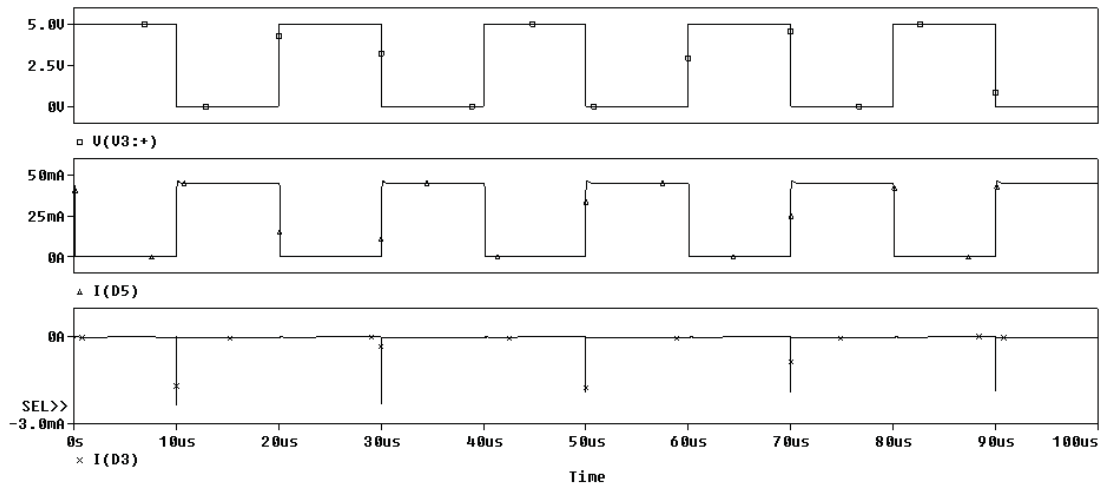
para Q2 é fornecida por Q3, através da fonte de tensão. Quando a tensão na base de Q4 é maior que a de Q3, a corrente de Q2 é fornecida através de Q4, que drenará a corrente através do LED e conseqüentemente será acionado. O diodo D3 é utilizado para proteger o LED, conduzindo os picos de corrente quando o LED é ligado.

Os resistores R10 e R11 são utilizados para manter a tensão de 2,5V na base de Q4, exigindo uma tensão maior do que 2,5V na base de Q3 para que o LED seja apagado, e menor do que 2,5V na base de Q3 para que o LED seja aceso.

### 3.2.3 Driver de acionamento

Quando o sinal de entrada é maior do que 2V, a base do transistor Q1 é mantida em 2,5V, situação que não permite a condução do transistor Q1. Fazendo com que a tensão na base de Q3 seja praticamente 5V, enquanto que na base de Q4 a tensão é de 2,5V, fazendo com que o transistor Q3 forneça toda a corrente para Q2, mantendo o LED desligado.

Quando o sinal de entrada é menor do que 0,4V, o emissor de Q1 é praticamente considerado aterrado, permitindo a condução do transistor Q1, e colocando a base de Q3 em nível



**Figura 3.18** – Formas de onda do circuito, com V3 a tensão de controle de acionamento e a corrente em D5 (LED) e a corrente no diodo de proteção D3.

lógico baixo (0V), devido a saturação de Q1. Ocasião em que Q4 fornece toda a corrente ao transistor Q2, acionando o LED.

Quando o sinal de entrada muda entre os níveis lógicos alto e baixo, a energia armazenada em C1 é usada para polarizar reversamente a junção base-emissor de Q1, para esgotar a carga armazenada na base, reduzindo o tempo de armazenamento e permitindo o sinal comutar de centenas de nanossegundos ao invés de alguns microssegundos.

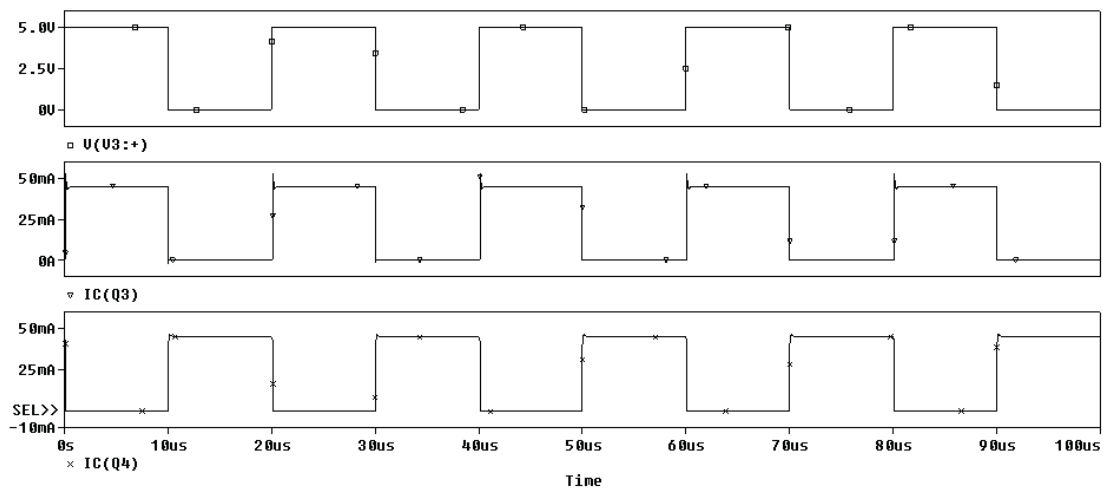
Os diodos D1 e D2 são para proteção do circuito, impedindo que tensões maiores do que 5V e tensões negativas danifiquem o circuito. O resistor R1 é um resistor de *pull-up*, para garantir a integridade dos sinais.

O funcionamento do circuito dos emissores é demonstrado na figura 3.18, onde é mostrado o sinal de acionamento e a corrente que passa pelo LED.

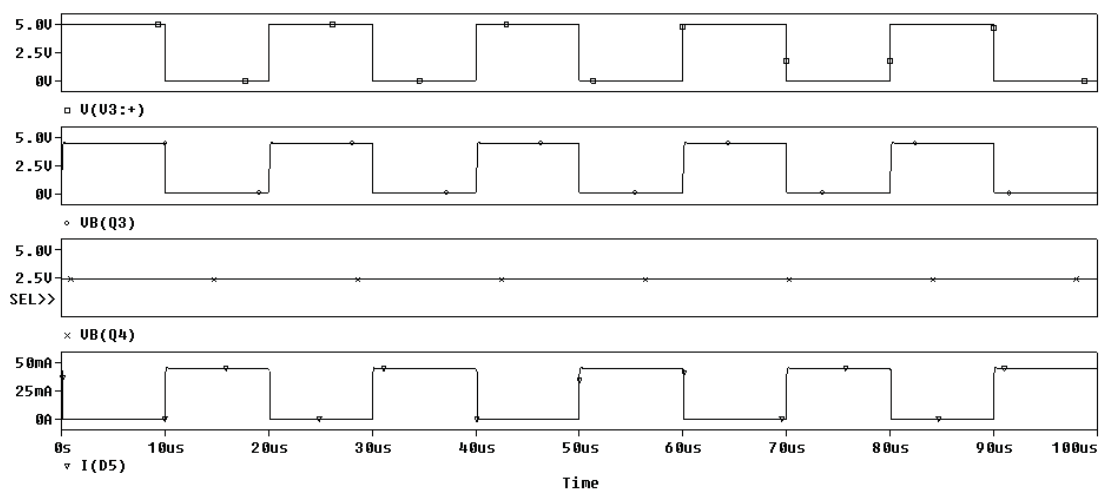
A figura 3.19 demonstra a relação da corrente sobre os transistores e o sinal de acionamento, para facilitar o entendimento.

A figura 3.20 demonstra o funcionamento do acionamento, com as tensões de controle (V3), a tensão de base no transistor Q3, a tensão de base no transistor Q4 e a corrente no LED (D5).

Com o circuito proposto para os emissores, cumprem-se todas as necessidades para a obtenção da performance desejada do sistema. O próximo passo é a recepção da radiação refletida de forma difusa pela amostra e captá-las pelos sensores.



**Figura 3.19** – Forma de onda do circuito, com o transistor Q4 como *driver* do LED e o transistor Q3 auxiliar.



**Figura 3.20** – Forma de onda do circuito, com D3 como diodo de proteção para o LED (D5).

### 3.2.4 Ajustes dos Emissores

Para que o sistema funcione adequadamente, inicialmente, deve-se ajustar as potências dos circuitos dos emissores, para que estes tenham a mesma intensidade. Este ajuste foi realizado com o auxílio de um multímetro, para conferir a variação da tensão do trimpot R6 (vide Figura 3.17) até obter-se o mesmo valor de intensidade em cada emissor. Para definir esses valores, foi acionado um emissor por vez e medido sua intensidade através do receptor com o auxílio de um multímetro. O valor da tensão em R6, dividido pela resistência em R9, será a corrente aplicada nos emissores.

## 3.3 Circuitos dos Sensores

Como o sinal recebido pelo sensor é pouco intenso, pois é resultado da reflexão difusa da luz sobre a amostra, é necessário um circuito de amplificação do sinal. Tal circuito é descrito a seguir.

### 3.3.1 Amplificador

O circuito da Figura 3.21 recebe o sinal do sensor, converte-o para tensão, passa-o por um filtro passa-alta para eliminar interferência externa (o sinal desejado é modulado enquanto o sinal da interferência é contínuo) e amplifica cem vezes o sinal original.

O resistor R1 e o capacitor C1 funcionam como filtro passa-baixa para a alimentação do fotodiodo e R2 tem a função de converter o pequeno sinal de corrente em uma tensão que possa ser perceptível pelo amplificador operacional. O primeiro amplificador operacional está montado como *buffer* para que o sinal possa passar pelo filtro. O capacitor C2 e o resistor R3 têm a função de filtrar os sinais DC, para que seja amplificado somente os sinais AC. O filtro está configurado para passar sinais acima de 589 Hz. Isto é para evitar interferências de iluminação de lâmpadas fluorescentes, que possuem reatores que trabalham com a frequência da rede de 60 Hz e conseqüentemente possuem harmônicas em 120 Hz. O segundo amplificador operacional está montado na forma não-inversora com ganho de  $1 + R5/R4$ , que, neste caso, é de 100 vezes.

Na Figura 3.22, é apresentado o sinal de entrada do circuito (I1), sem interferência (*offset*) e a saída do circuito. Percebe-se um *offset* de aproximadamente 400mV na saída do circuito, devido ao próprio *offset* do amplificador operacional.

Para garantir que o *offset* é por causa do amplificador operacional, foi inserido um sinal DC de amplitude 400 vezes maior que o sinal AC. Como pode ser visto na Figura 3.23, a saída do circuito apresenta as mesmas características que o anterior, sem o sinal DC.

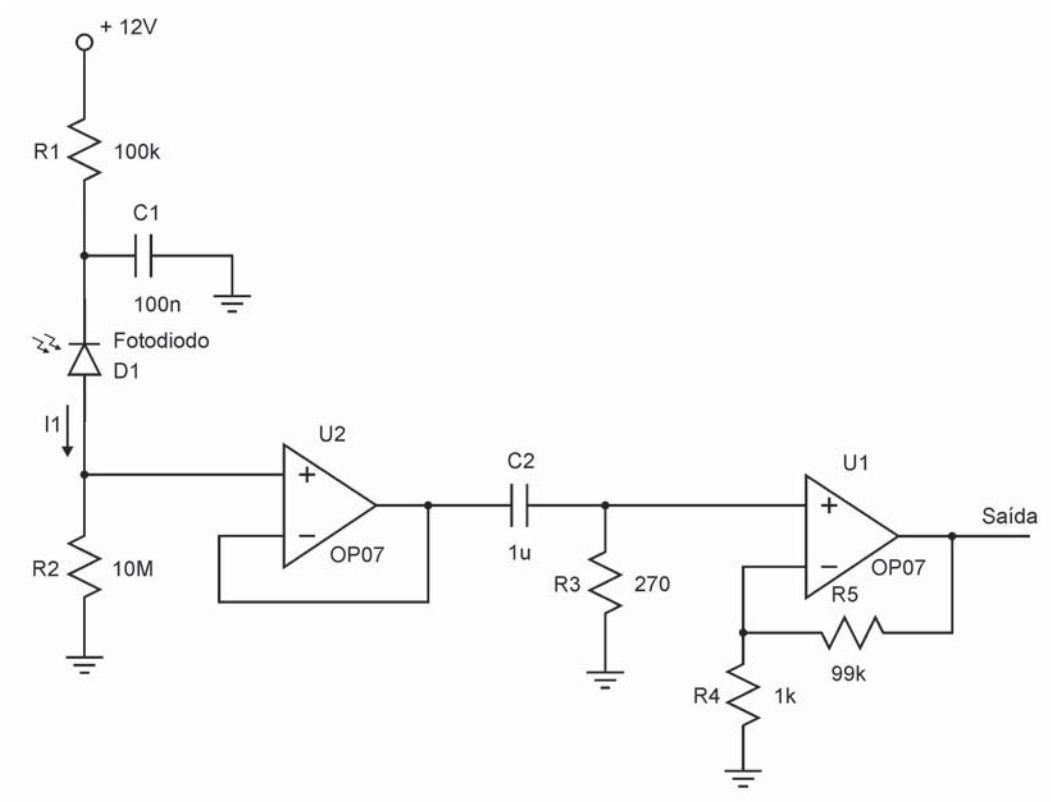


Figura 3.21 – Circuito de amplificação dos sensores.

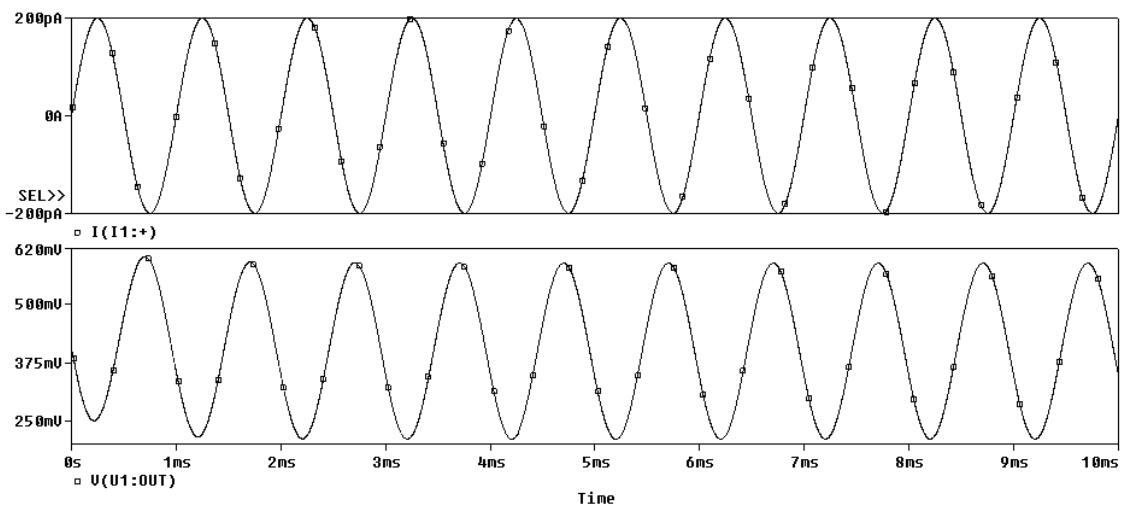
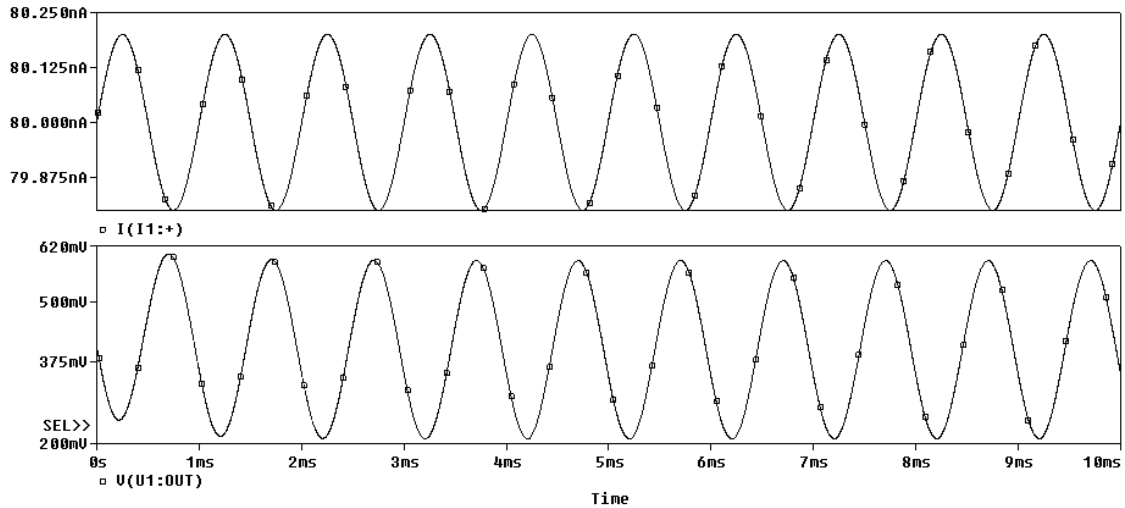


Figura 3.22 – Formas de onda do circuito da Figura 3.21 com sinal de entrada sem *offset*.



**Figura 3.23** – Formas de onda do circuito da Figura 3.21 com *offset* 400 vezes maior que o sinal de entrada.

Este *offset* na saída do sinal pode ser solucionado escolhendo um outro amplificador operacional com baixo *offset*.

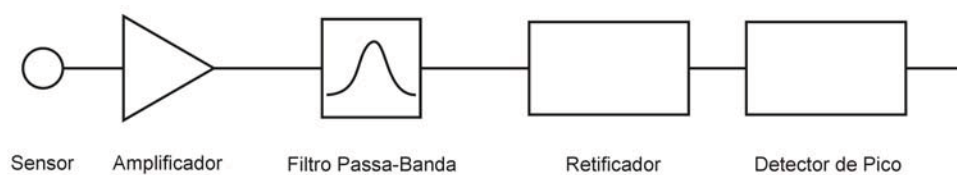
Foi escolhido o circuito da Figura 3.21 devido à velocidade de resposta (configuração de fotocorrente). Neste experimento, foi ajustada a frequência de condução do filtro passa-alta para obter uma melhor resposta, com o auxílio de um osciloscópio. Após as medições, verificou-se a possibilidade de aumentar o ganho do circuito para diminuir o efeito do ruído térmico. Entretanto, essa possibilidade não foi realizada porque foi observada a possibilidade de diminuir o comprimento do tubo onde são fixados os espelhos e os LEDs. Com esta diminuição, haverá um aumento na amplitude da radiação refletida, pois a distância da amostra diminuirá, podendo não haver a necessidade de amplificação dos sinais. Esta melhoria na configuração é demonstrada no final do capítulo 4.

## 3.4 Condicionamento do Sinal

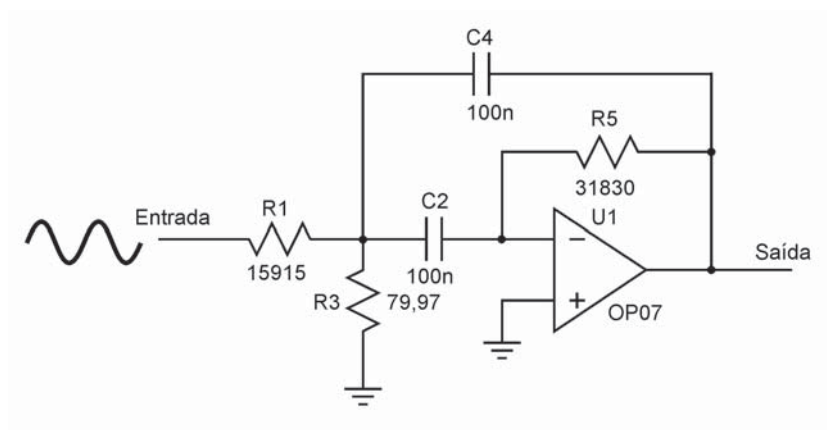
Após a amplificação do sinal dos sensores, é necessário o condicionamento do sinal para que seja possível mensurar a amplitude destes sinais. Dentre as várias opções, foi decidido utilizar um filtro passa-faixa na frequência da modulação dos LEDs, um circuito para retificar os sinais amplificados e, em seguida, um detector de pico para identificar a amplitude do sinal (Figura 3.24). Tais circuitos são explicados a seguir.

### 3.4.1 Filtro Passa-Faixa

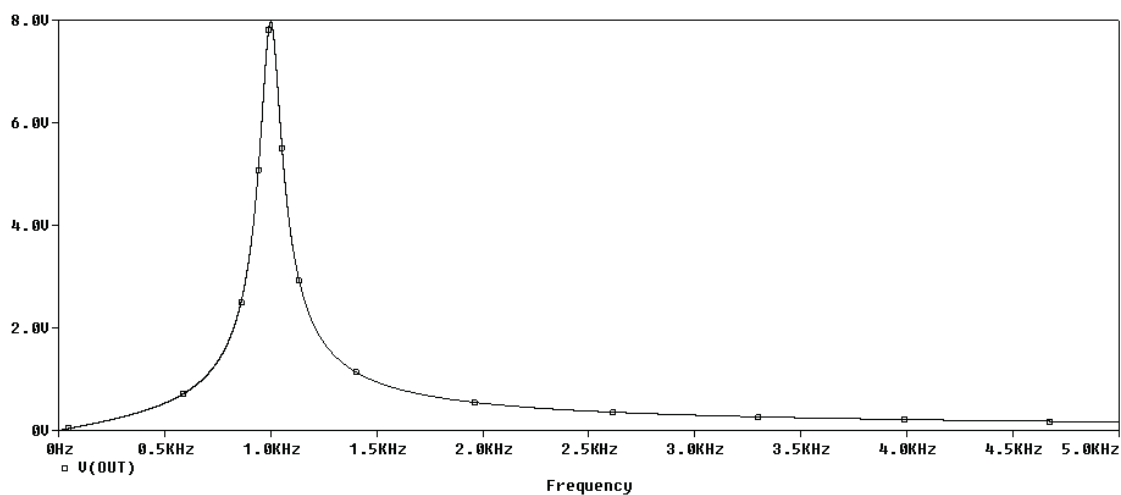
Um circuito para filtrar os sinais de frequência diferente do sinal modulado dos LEDs para eliminar o máximo de interferência possível foi utilizado, após a amplificação dos sinais.



**Figura 3.24** – Diagrama da primeira opção do sistema eletrônico



**Figura 3.25** – Circuito do filtro passa-faixa



**Figura 3.26** – Resposta do circuito do filtro passa-faixa

Na Figura 3.25, é apresentado o circuito do filtro passa-faixa com frequência central em 1kHz e com largura de banda estreita. A resposta deste circuito é mostrado na Figura 3.26. Percebe-se a estreita largura de banda do filtro, necessária para eliminar o máximo de ruídos do sistema. Aliando este circuito ao circuito dos emissores, com a mesma frequência, obtêm-se uma rejeição muito alta de interferências.

O próximo passo é a retificação do sinal alternado para posterior mensuração.

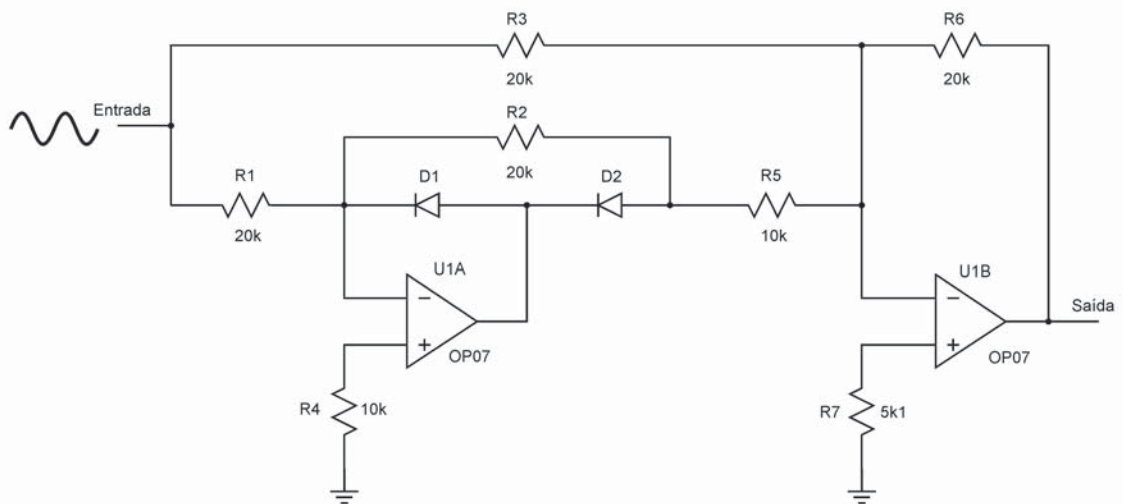


Figura 3.27 – Circuito de retificação do sinal AC.

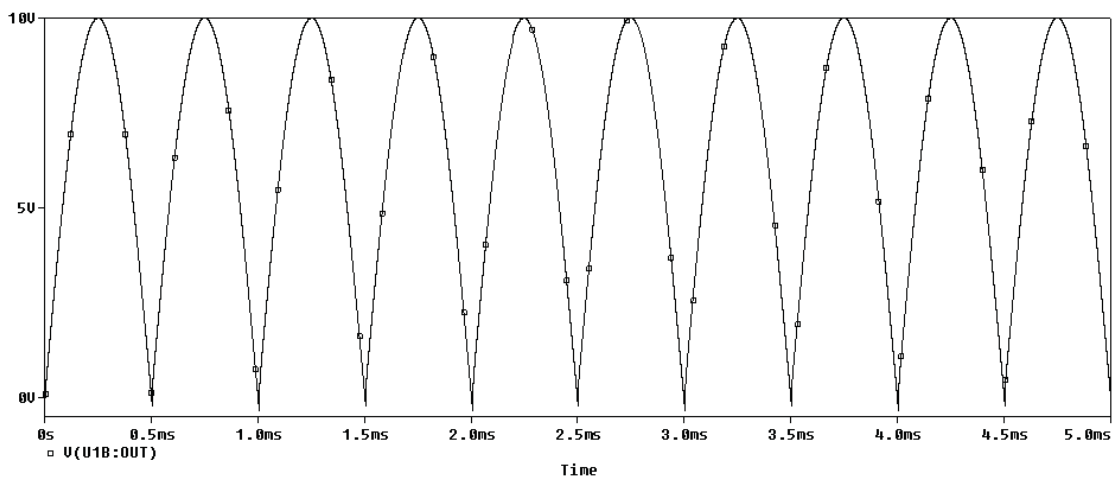
### 3.4.2 Retificador

Uma das alternativas para detectar a amplitude do sinal é a retificação ou a eliminação do semiciclo negativo do sinal. Para isto, é apresentado na Figura 3.27, um circuito de retificação de precisão de onda completa.

A primeira parte do circuito da Figura 3.27 é um retificador de precisão de meia onda. Para que o circuito seja um retificador de precisão de onda completa, foi acrescentada a segunda parte, que é um somador com o dobro da amplitude da entrada comparado com a saída da primeira etapa. Neste circuito, quando o sinal da entrada está no semiciclo positivo, a saída do primeiro amplificador operacional torna-se negativa, fazendo com que o diodo da saída (D2) conduza, transformando o circuito do amplificador operacional (U1A) em um amplificador inversor com ganho unitário. Com isso, o circuito somador dá-se pela saída do amplificador inversor sobre o resistor R5 e a entrada do sinal sobre o resistor R3, multiplicados por  $-R6$ , ou seja, o resultado da saída do circuito somador dá-se pela multiplicação do sinal de entrada pelo resistor R6, dividido pelo resistor R3.

$$v_o = -R6 \left( \frac{v_i}{R3} - \frac{v_i}{R5} \right). \quad (3.1)$$

Quando o sinal da entrada está no semiciclo negativo, a saída do primeiro amplificador operacional torna-se positiva, fazendo com que o diodo de realimentação (D1) conduza, tornando o circuito do amplificador operacional (U1A) em um *buffer*. Como a entrada positiva do primeiro amplificador está ligada a um resistor ao terra, está entrada fica com potencial nulo. Devido ao curto-circuito virtual das entradas, a entrada negativa do amplificador operacional apresenta um terra virtual, tornando nulo o potencial do sinal sobre o resistor R5 na entrada



**Figura 3.28** – Formas de onda do circuito da Figura 3.27.

do circuito somador. A outra entrada do somador é a entrada do sinal sobre o resistor R3. A saída do circuito somador resulta na multiplicação da entrada do sinal invertido, pelo resistor R6, dividido pelo resistor R3. Como resultado final, tem-se a soma dos dois semiciclos.

A próxima etapa é passar o sinal retificado por um detector de pico para poder identificar a amplitude do sinal.

### 3.4.3 Detector de Pico

Com o sinal retificado, basta mensurar a amplitude do sinal para que seja possível referenciá-lo com a unidade.

O circuito de detecção de pico é mostrado na Figura 3.29. O funcionamento deste circuito dá-se pela passagem do sinal pelo primeiro amplificador operacional (U1A) e, como tem-se somente sinais positivos (devido a retificação), o diodo da saída (D1) conduz, carregando o capacitor (C1), que tem a finalidade de armazenar o maior valor do sinal. Enquanto o transistor (Q1) não estiver polarizado (funcionando como uma chave aberta), o valor máximo do sinal armazenado no capacitor (C1) será amostrado na saída do segundo amplificador operacional (U1B). Como, idealmente, o amplificador operacional não drena corrente, o valor armazenado no capacitor permanece enquanto o transistor não for polarizado.

Quando o transistor (Q1) conduz, o capacitor (C1) é descarregado e o valor do sinal na entrada do primeiro amplificador operacional (U1A) é amostrado na saída do circuito, como apresentado na Figura 3.30.

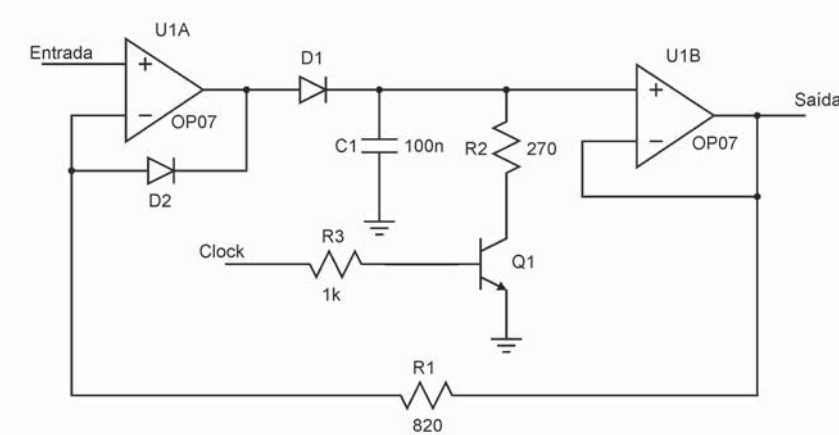


Figura 3.29 – Circuito do detector de pico.

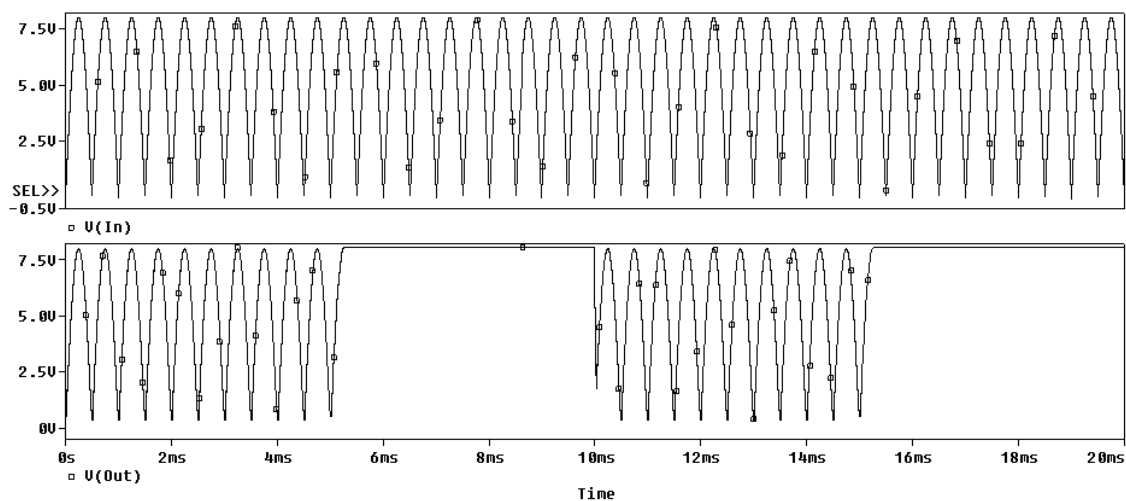


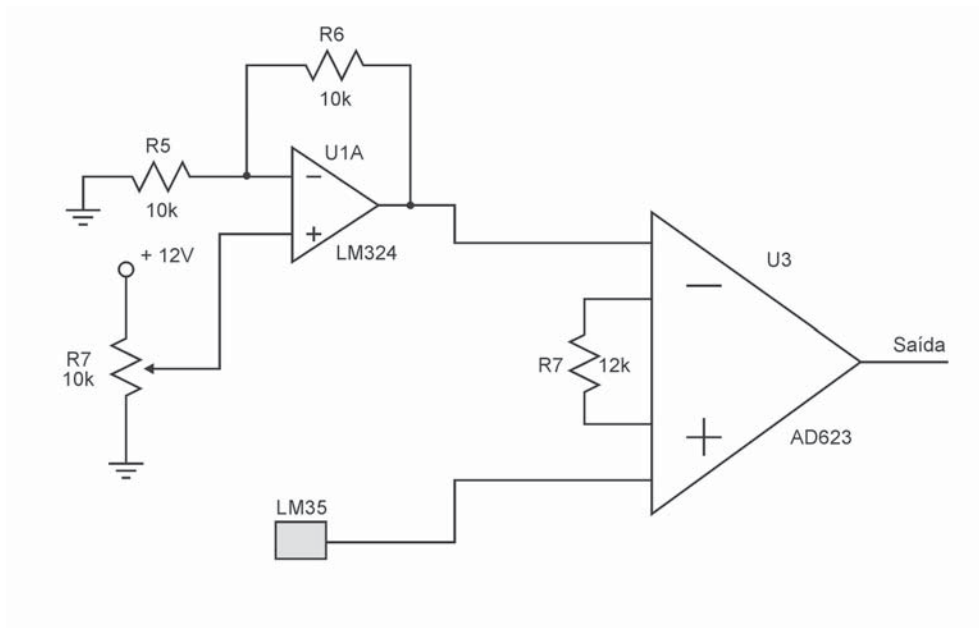
Figura 3.30 – Resposta do detector de pico.

### 3.5 Controle de Temperatura

O sistema deve manter os sensores sempre a mesma temperatura por causa da alta sensibilidade dos sensores ópticos à variação de temperatura. Para isto, necessita-se de um sensor para medição da temperatura, o processamento dessa informação e posteriormente a tomada de decisão para manter o sistema estável.

Para a medição de temperatura do sistema, existem várias opções de sensores no mercado. Os mais conhecidos são os termistores (NTC e PTC), PT100, termopares, e alguns sensores analógicos (LM35) e digitais (LM76, LM92, DS18S20). Foi escolhido o sensor LM35 pelo baixo custo e pela disponibilidade.

O sensor LM35 não necessita de linearização, mas sua resposta é relativamente pequena ( $10\text{mV}/^\circ\text{C}$ ) (National, 2000). Portanto, para este sensor, basta subtrair de uma tensão de referência e amplificar o sinal para a amplitude necessária ao acionamento do elemento Peltier.



**Figura 3.31** – Circuito de comparação e amplificação do sensor LM35.

Tal circuito é apresentado na Figura 3.31. Neste circuito a entrada inversora do amplificador diferencial representa o *setpoint* da temperatura desejada e a entrada não-inversora, a temperatura convertida em tensão pelo sensor LM35.

### 3.5.1 Controle de Temperatura

Para o circuito do elemento Peltier, é necessário um circuito que forneça uma corrente considerável (acima de 2A) e que possibilite a inversão do sentido da corrente, para que, quando necessário, o elemento Peltier possa esfriar e também aquecer. A figura 3.32 ilustra o circuito de controle que permite a inversão do sentido da corrente e a sua intensidade, de acordo com a entrada não-inversora do amp-op.

Na figura 3.33, é mostrado a variação no sentido da corrente, de acordo com a variação da tensão de entrada do circuito, podendo fazer um controle nos dois sentidos de corrente no elemento Peltier.

A corrente que passa pelo elemento Peltier é dada pela tensão de entrada dividida pelo valor da resistência R1. Isto torna o circuito fácil de controlar.

### 3.5.2 Ajustes da Temperatura

Novamente, antes de o circuito poder ser utilizado, alguns ajustes devem ser realizados.

Através do potenciômetro presente no circuito de medição da temperatura (ilustrado na Figura 3.31), foi ajustada a temperatura do receptor para 20°C. Devido a temperatura ambi-

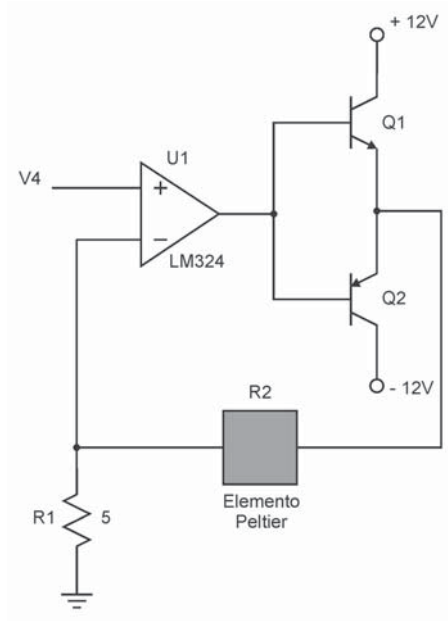


Figura 3.32 – Circuito de controle do elemento Peltier.

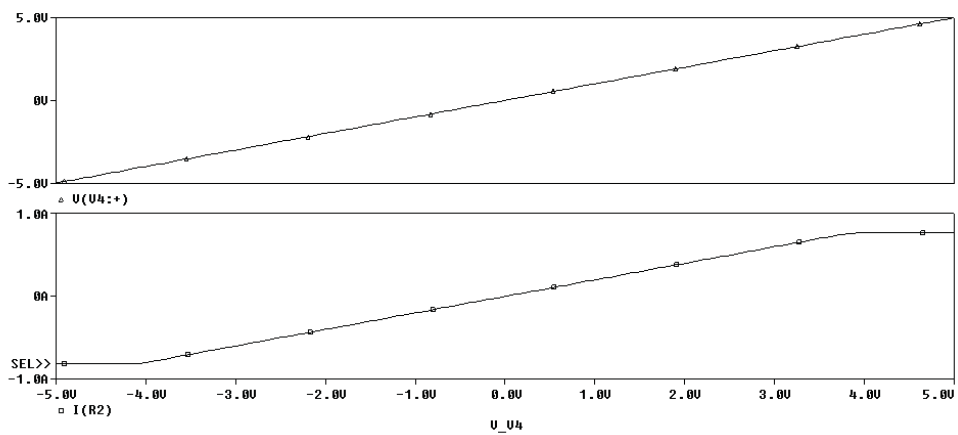


Figura 3.33 – Resposta do circuito de controle do elemento Peltier.

ente e ao dissipador empregado no sistema, foi necessário a utilização de um ventilador (*cooler* de computador encontrado nas lojas locais) para aumentar a troca de calor do dissipador com o ambiente.

Com os circuitos montados e funcionando, a próxima etapa foi o teste para validação do sistema.

---

# RESULTADOS EXPERIMENTAIS

---

Nesta capítulo, são apresentados a metodologia e os resultados dos testes realizados no sistema de medição. O objetivo foi avaliar a sensibilidade do sistema e a sua robustez com relação a variação da intensidade do sinal elétrico gerado pelos circuitos e a variação da umidade.

## 4.1 Configuração do Sistema

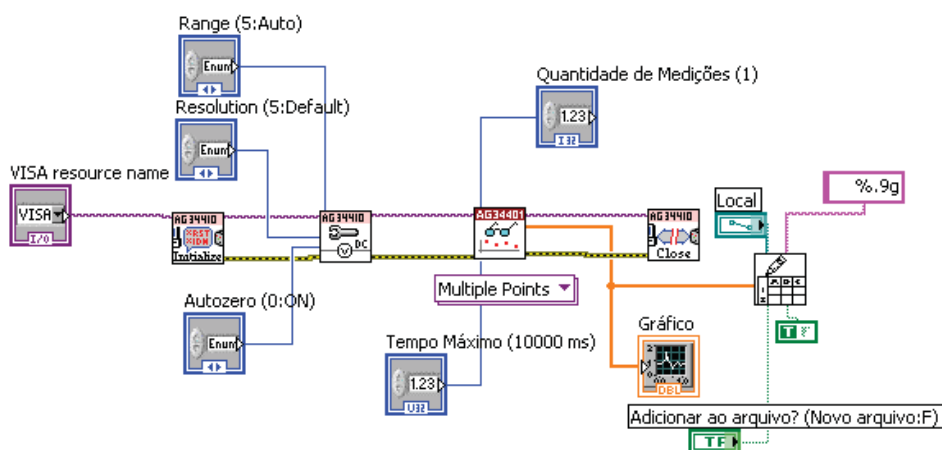
Nas sub-seções subseqüentes, descreve-se como o sistema foi configurado para utilização em todos os testes realizados.

### 4.1.1 Sistema Óptico

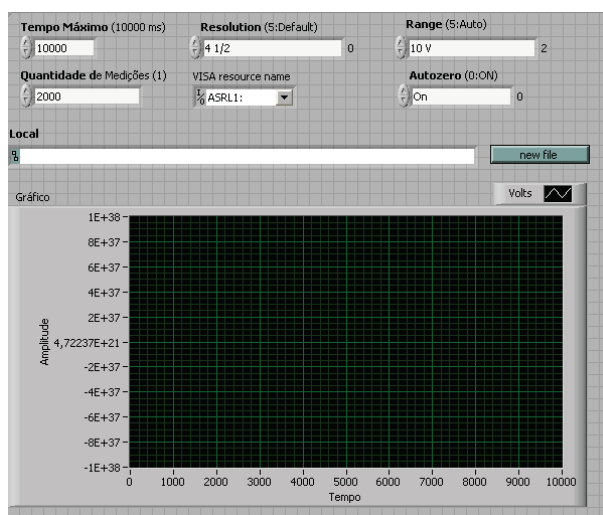
Em todos os experimentos, o sistema óptico utilizado foi o arranjo de espelhos composto pelo espelho côncavo e um espelho plano, como foi o descrito na seção 3.1, ilustrado na Figura 3.1. A sua escolha foi pelo fato desta ser a montagem mais econômica. Contudo, como é mostrado nas próximas seções, os resultados obtidos foram satisfatórios.

### 4.1.2 Cálculo da Umidade

Para o cálculo da umidade, foram utilizadas amostras de café em pó, adquiridas no mercado local da cidade de Londrina, no Paraná. Estas amostras foram separadas em porções, que foram umedecidas com quantidade variada de água. Em seguida, essas foram deixadas descansar por um período de aproximadamente duas horas para obter uma distribuição uniforme da umidade na amostra. O método para o cálculo da umidade das amostras foi o método padrão utilizado no Brasil (método da estufa), descrito na seção 2.1.



**Figura 4.1** – Imagem da tela de programação do programa no LabVIEW.



**Figura 4.2** – Imagem da tela de visualização do programa no LabVIEW.

Para a aquisição dos valores resultantes, foi utilizado um multímetro de bancada, de precisão de 6 e 1/2 dígitos, para medir os valores da saída do sistema, com o auxílio do *software* LabVIEW. O programa para a aquisição dos dados possibilita a configuração da resolução, da quantidade de pontos e salva os dados em arquivo texto para posterior análise. O diagrama de blocos do instrumento virtual desenvolvido para a aquisição dos dados pode ser visualizado na Figura 4.1 e a interface gráfica, com um painel para a visualização da forma de onda, é ilustrado na Figura 4.2.

Posteriormente, um osciloscópio de dois canais foi utilizado para capturar os sinais em diversos pontos do circuito para facilitar a análise.

## 4.2 Tipos de Testes

Nesta seção, são apresentados os tipos de testes utilizados na validação dos circuitos.

Na Figura 4.3, é representada com mais detalhes, a montagem implementada para as medições, de acordo com os itens enumerados a seguir.

1. Espelho plano (em conjunto com o espelho côncavo, forma o conjunto óptico);
2. Espelho côncavo;
3. Placa de Alumínio (para transmitir a temperatura do detector ao Elemento Peltier);
4. Detector;
5. Placa de circuito impresso (circuitos de amplificação do sinal, filtros e detector de pico);
6. Dissipador de Alumínio para troca de calor (Detector  $\rightarrow$  Placa de Alumínio  $\rightarrow$  Elemento Peltier  $\rightarrow$  Dissipador  $\rightarrow$  Ar);
7. Elemento Peltier;
8. Emissores (LEDs);
9. Lâmpada incandescente para simular interferência luminosa (lâmpada do farol de moto - 5W, modelo GE 1077);
10. Pires para acondicionar as amostras.

As amostras foram colocadas em pires de vidro, com quantidade suficiente para cobrir totalmente o recipiente, para evitar reflexão da radiação pelo vidro, e colocada no centro do tubo, a aproximadamente 15 cm dos emissores.

### 4.2.1 Sensibilidade

Neste teste, deseja-se avaliar a variação da tensão adquirida na saída do transdutor em função da umidade. Para isto, foram realizadas várias medições para a mesma amostra, com dez minutos de intervalo entre cada medição. Nestas medições, foram realizadas duas mil aquisições para cada faixa de absorção da água (sub-seção 2.2.3), com frequência de aquisição das amostras de 1kHz.

Na Figuras 4.4, 4.5 e 4.6, são apresentados os gráficos das medições para as faixas de absorção da água versus amplitude. Pode-se verificar a variação da amplitude do sinal resultante com a variação da umidade nas amostras. Como o descrito na Sub-Seção 2.2.3, a intensidade da radiação refletida diminuiu com o aumento da umidade.

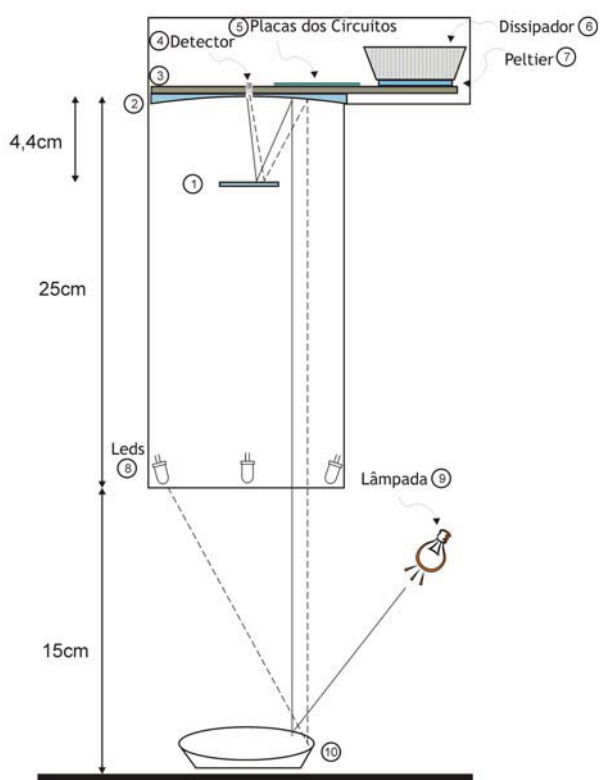


Figura 4.3 – Montagem atual do equipamento.

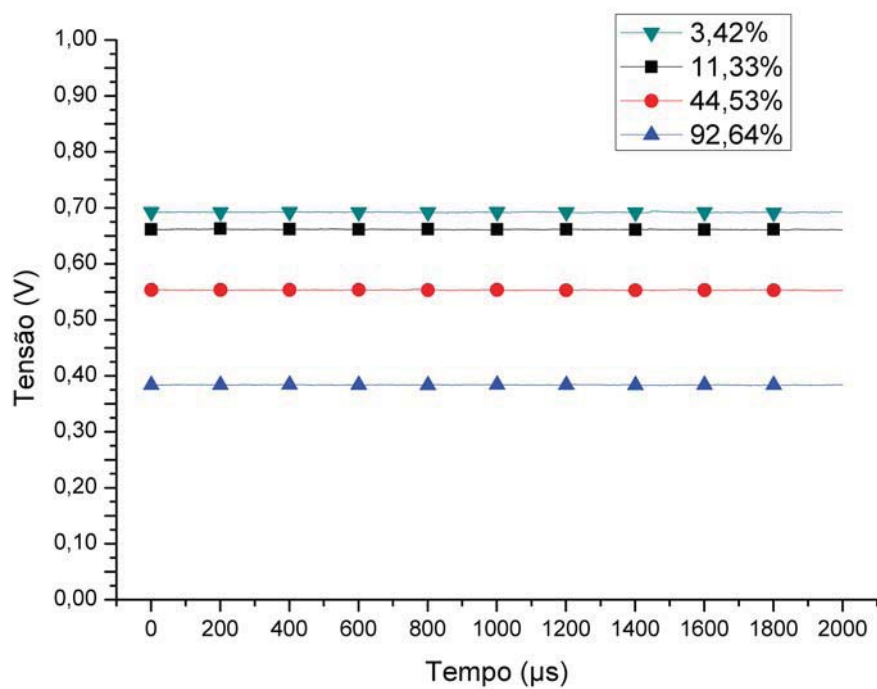
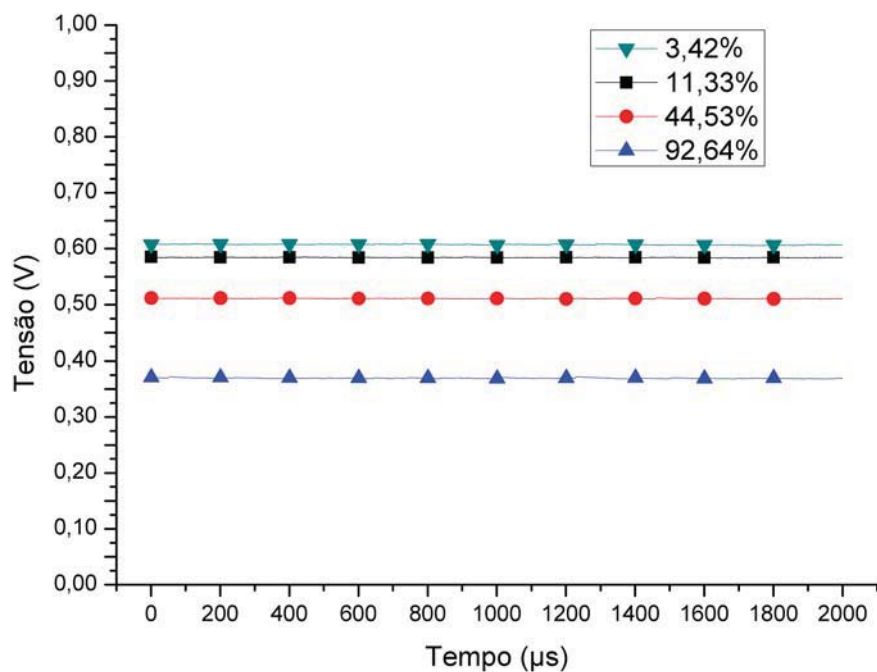
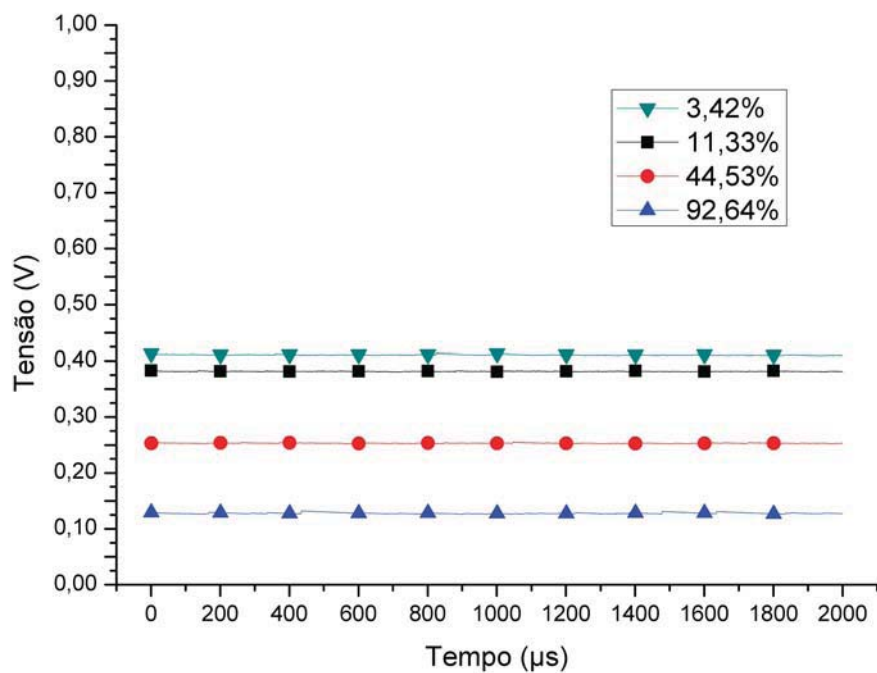


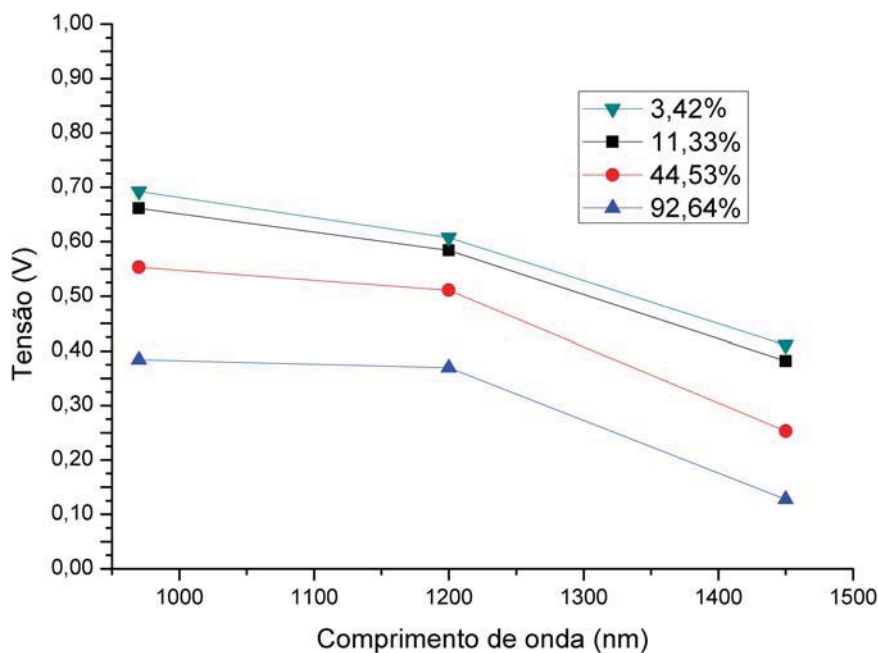
Figura 4.4 – Valores obtidos pelo equipamento proposto na faixa de 970nm.



**Figura 4.5** – Valores obtidos pelo equipamento proposto na faixa de 1200nm.



**Figura 4.6** – Valores obtidos pelo equipamento proposto na faixa de 1450nm.



**Figura 4.7** – Valores obtidos pelo equipamento proposto nas 3 faixas de absorção da água.

Foi empregado o cálculo da mediana dos dois mil valores adquiridos em cada medição, para poder traçar um único ponto para visualização da curva característica, com as três faixas de absorção da água. Este gráfico é apresentado na Figura 4.7 com valores de umidade diferentes, o que comprova a sensibilidade do sistema para a variação da umidade. Também, é possível verificar a variação da amplitude do sinal com a variação da umidade, sendo esta variação, inversamente proporcional. Na Figura 4.8 é demonstrado a relação da variação da tensão com a umidade para verificar a linearidade desta variação para decisão futura do método de calibragem do sistema.

Para o primeiro comprimento de absorção da água, a variação da amplitude é de aproximadamente 3,52 mV por 1% de umidade, com desvio padrão de 0,00032. No segundo comprimento a variação é de 2,94 mV e 0,00042. Por último, no terceiro comprimento, a variação é de 3,69 mV e 0,00068.

A sensibilidade pode ser melhorada aumentando o a potencia da radiação emitida pelo circuito, para que os ruídos presentes influenciem menos. Além disso, pode-se reduzir o comprimento do tubo, onde são fixados os emissores, diminuindo o percurso da radiação da amostra para o detector, conseguindo captar uma intensidade maior do sinal.

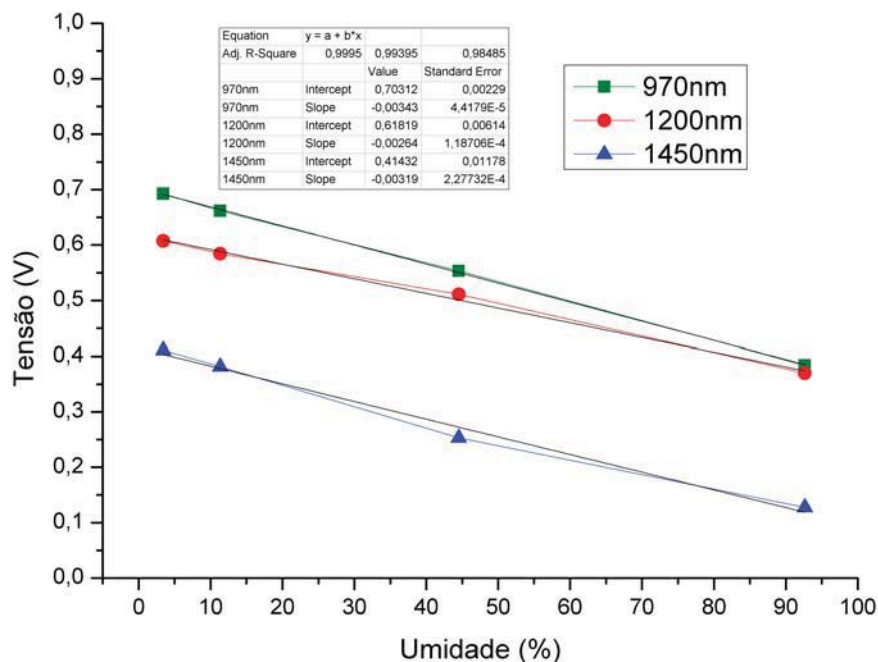


Figura 4.8 – Tensão vs umidade para verificação da linearidade.

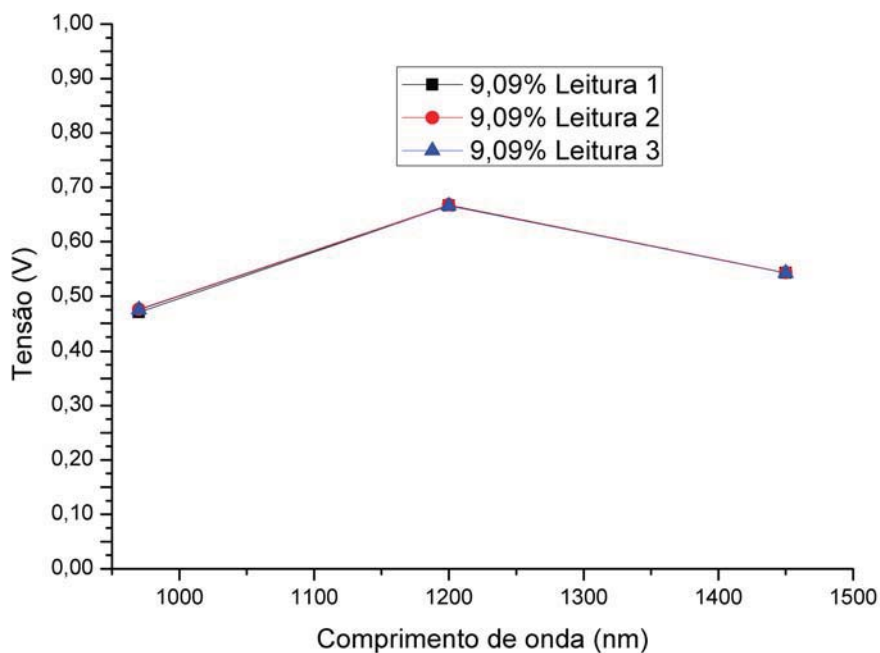
## 4.2.2 Repetibilidade

Neste teste, foi avaliada a capacidade do sistema em apresentar os mesmos resultados para a mesma amostra.

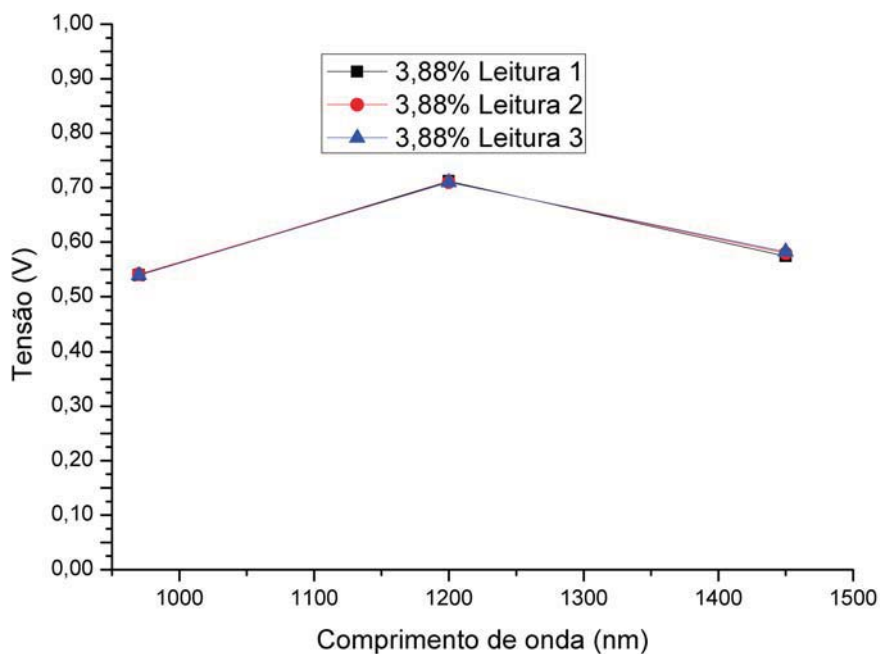
Inicialmente foi analisada a estabilidade da medição com o tempo. Para estudar a repetição destes dados, após realizar as medições das três faixas, esperou-se dez minutos para realizar novamente as medições. Efetuou-se, também, o desligamento do sistema, e, após religar, esperou-se novamente dez minutos para realizar outra medição.

Considerando que o ruído presente na medição segue uma distribuição normal e calculando a média e o desvio padrão, é possível afirmar que a probabilidade dos valores estarem entre (693,79 mV , 690,75 mV), (609,71 mV , 604,98 mV) e (413,01 mV , 408,79 mV) é de 99,7% para a primeira, segunda e terceira faixas de absorção da água, respectivamente, para a amostra com 3,42% de umidade. Ou seja, apresenta uma incerteza de 0,15%, 0,23% e 0,21% nos valores. Estes resultados são perceptíveis visualmente nas Figuras 4.4, 4.5 e 4.6, onde são apresentadas mínimas variações na amplitude em relação ao tempo.

Os gráficos representados nas Figuras 4.9 e 4.10 ilustram os dados adquiridos por esse experimento. É possível, visualmente, confirmar a afirmação de que o sistema apresenta uma boa repetibilidade, através destes gráficos, e matematicamente pelas medianas dos valores obtidos. Tendo como desvio padrão das medianas os seguintes valores: 0,31%, 0,10%, 0,04%,



**Figura 4.9** – Valores obtidos pelo equipamento proposto nas 3 faixas de absorção da água para amostra com 9,09 % de umidade.



**Figura 4.10** – Valores obtidos pelo equipamento proposto nas 3 faixas de absorção da água para amostra com 3,88 % de umidade.

para a amostra com 9,09% de umidade e na primeira, segunda e terceira faixa de absorção da água, respectivamente.

### 4.2.3 Dependência Térmica do Receptor

Este experimento tem como finalidade a verificação da dependência térmica do receptor. Para isto, foi alterada a temperatura de funcionamento do receptor (sensor InGaAs) de  $20^{\circ}C$  para  $13^{\circ}C$ . Os resultados obtidos sem o acionamento de nenhum emissor, somente o *offset* do circuito, estão na Figura 4.11. Com uma variação da intensidade do sinal apresentado neste gráfico, de aproximadamente  $6,73mV/^{\circ}C$  e a média da variação com a umidade igual a aproximadamente  $3,52mV/\%$  umidade, comprova-se a dependência da amplitude do sinal resultante do receptor com a temperatura e aumenta-se a importância do circuito de controle da temperatura.

Por causa da dependência da temperatura ambiente na dissipação do calor do receptor e, conseqüentemente, a eficiência da troca de calor do dissipador com o ambiente, não foi possível conferir se esta variação é linear. Já que, diminuindo mais a temperatura do sistema, o conjunto do trocador de calor não consegue realizar eficientemente esta tarefa. Assim, propõe-se a substituição do dissipador tradicional (refrigeração a ar) por um dissipador com refrigeração a água. Devido ao calor específico da água ( $1,0 cal/g.^{\circ}C$ ) ser muito maior do que do ar ( $0,24 cal/g.^{\circ}C$ ), a troca de calor entre o dissipador será maior. Com isto, é eliminada a dependência da temperatura do sistema com a temperatura ambiente para a troca de calor.

### 4.2.4 Imunidade a Interferência Luminosa

Neste teste, o objetivo foi verificar a imunidade das medições à interferência luminosa externa.

A montagem para este experimento foi a configuração ilustrada na Figura 4.3, com o emprego de uma lâmpada incandescente (5W, 12V DC) para simular a interferência de fontes luminosas externas de infravermelho. Tal lâmpada foi utilizada para comparar os resultados das medições.

Nas Figuras 4.12 e 4.13, são apresentadas várias leituras para umidade (definidos pelo método padrão na Seção 2.1) de 9,09% e 3,88% respectivamente, incluindo medições com interferência de uma fonte luminosa externa, para demonstrar a estabilidade da leitura a interferência luminosa. O resultado deste experimento demonstra um desvio padrão entre a média dos valores adquiridos, sem e com interferência, de  $498,27 \times 10^{-6}$ ,  $660,11 \times 10^{-6}$  e  $620,45 \times 10^{-6}$ , para as três faixas de absorção da água para a amostra com 9,09% de umidade. Percebe-se, portanto, que o sistema proposto apresenta uma boa imunidade a interferência luminosa externa, tendo solucionado a limitação de fixação do equipamento em locais abertos.

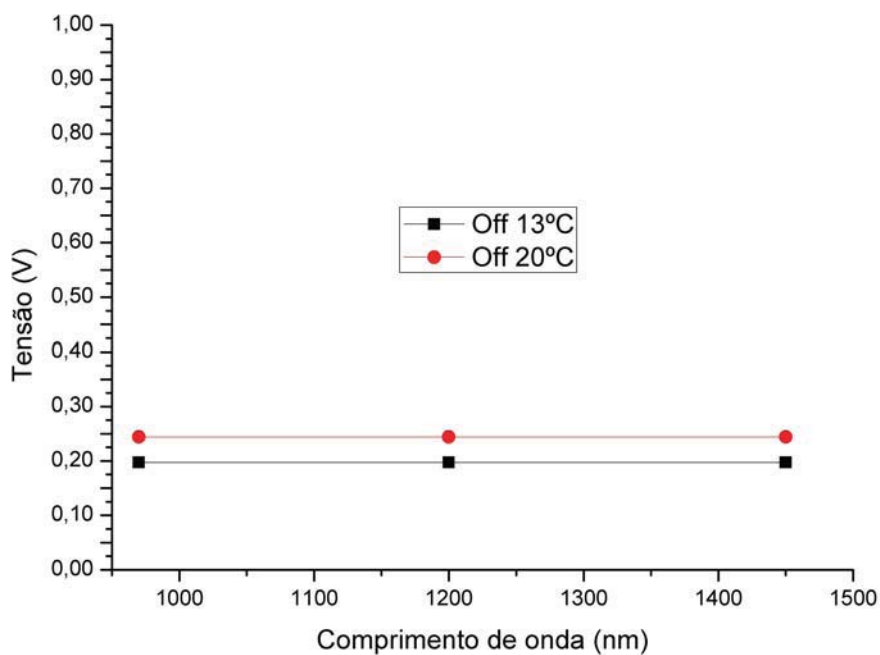


Figura 4.11 – Dependência da amplitude do sinal com a temperatura.

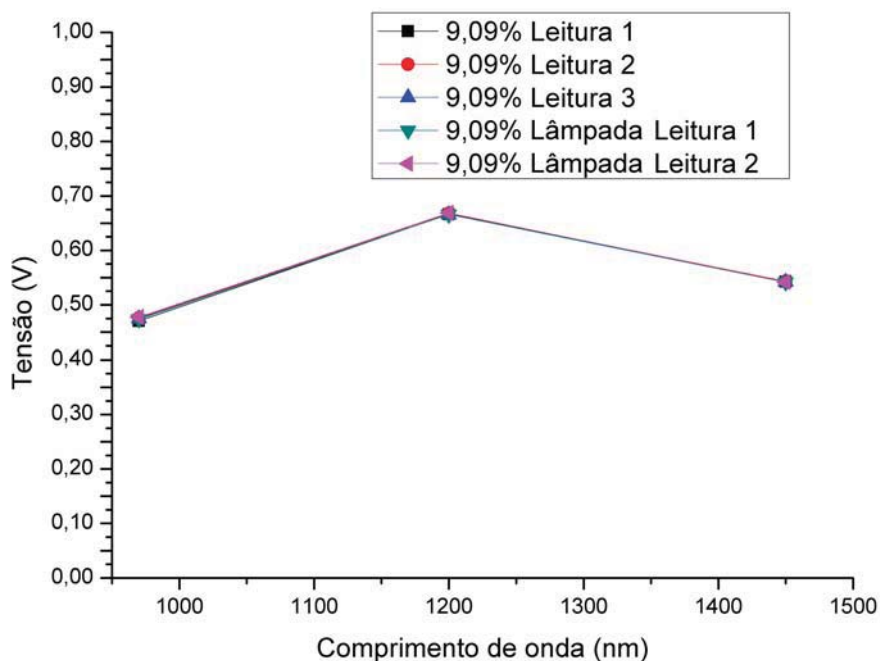
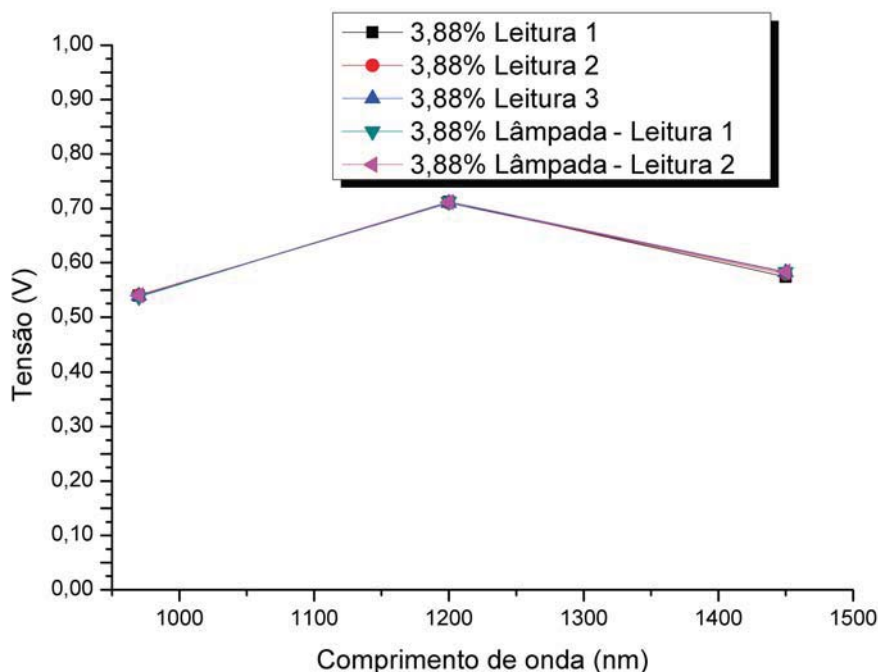


Figura 4.12 – Valores obtidos pelo equipamento proposto nas 3 faixas de absorção da água, com interferência luminosa, para amostra com 9,09 % de umidade.



**Figura 4.13** – Valores obtidos pelo equipamento proposto nas 3 faixas de absorção da água, com interferência luminosa, para amostra com 3,88 % de umidade.

Na Figura 4.13, para a primeira medição, há a probabilidade de 99,7% dos valores adquiridos, estarem na faixa de (541,08 mV , 537,84 mV), (713,91 mV , 710,18 mV) e (576,04 mV , 572,46 mV) para a primeira, segunda e terceira faixa de absorção da água respectivamente. Portanto, uma incerteza de 0,12%, 0,17% e 0,13% para as três faixas citadas anteriormente.

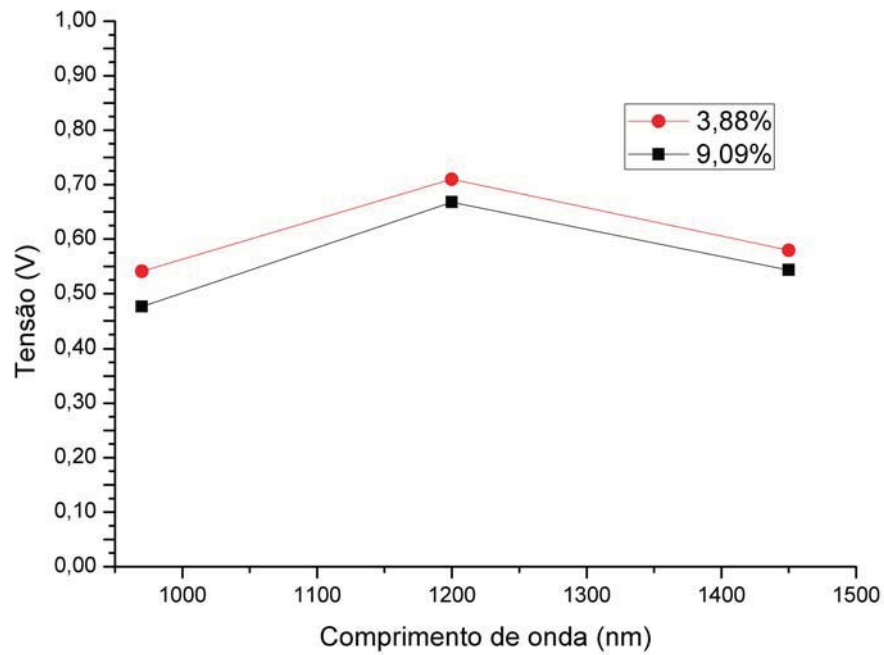
Estes dados são apresentados em um mesmo gráfico (Figura 4.14) para medições com o sensor mantido em  $13^{\circ}C$ , para facilitar a visualização da variação da intensidade luminosa com a variação da umidade.

Neste teste, a medição com a ajuda de um osciloscópio foi realizada nos pontos indicados nas Figuras 4.15, 4.22 e 4.25, para analisar as etapas do sistema.

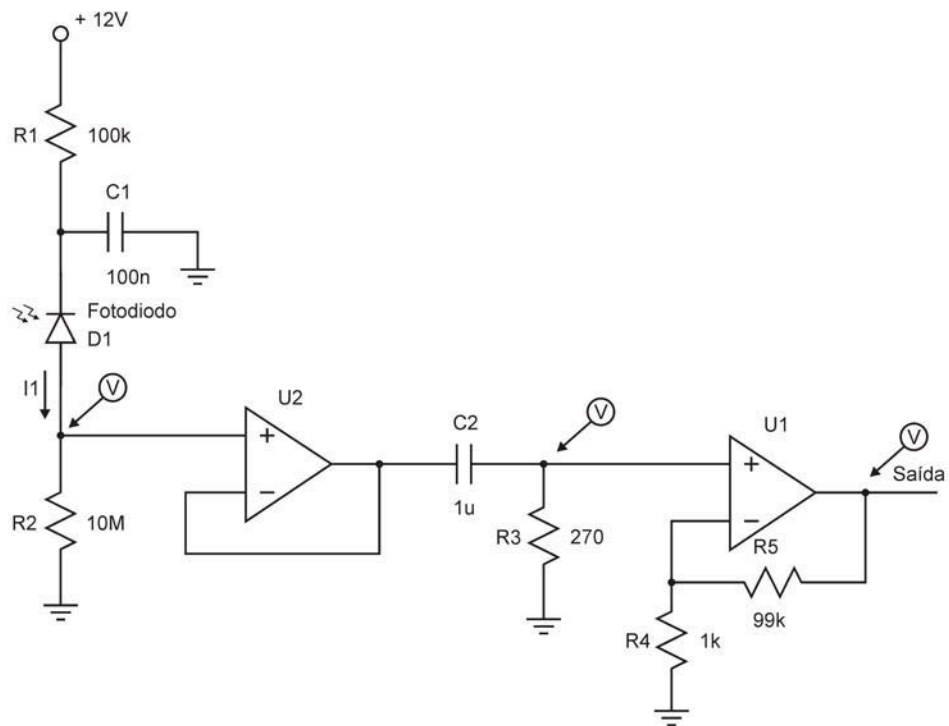
A Figura 4.16 ilustra o sinal captado pelo sensor na primeira faixa de absorção da água e a Figura 4.17 com a interferência luminosa. Estes gráficos têm o objetivo de demonstrar a importância da imunidade a interferências luminosas, pois alguns equipamentos existentes não possuem este recurso, o que causa efeitos danosos na medição.

O funcionamento do filtro passa-alta é verificado nas Figuras 4.18 e 4.19, que representa a saída deste filtro para a medição sem interferência luminosa e com interferência luminosa, respectivamente.

A amplificação do sinal, com e sem interferência luminosa, é apresentado nas Figuras 4.20



**Figura 4.14** – Valores obtidos pelo equipamento proposto nas 3 faixas de absorção da água, com interferência luminosa, para amostra com 3,88 % e 9,09 % de umidade.



**Figura 4.15** – Indicação no circuito do local da aquisição do gráfico pelo osciloscópio.

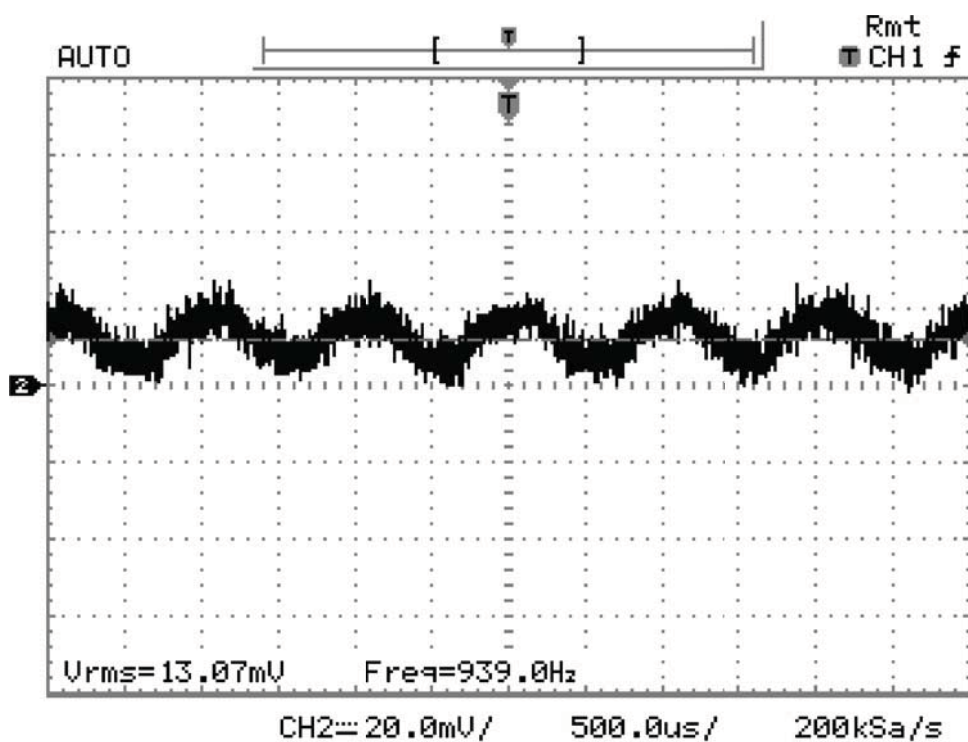


Figura 4.16 – Gráfico do osciloscópio para faixa de 970 nm do sinal do sensor, sem interferência luminosa.

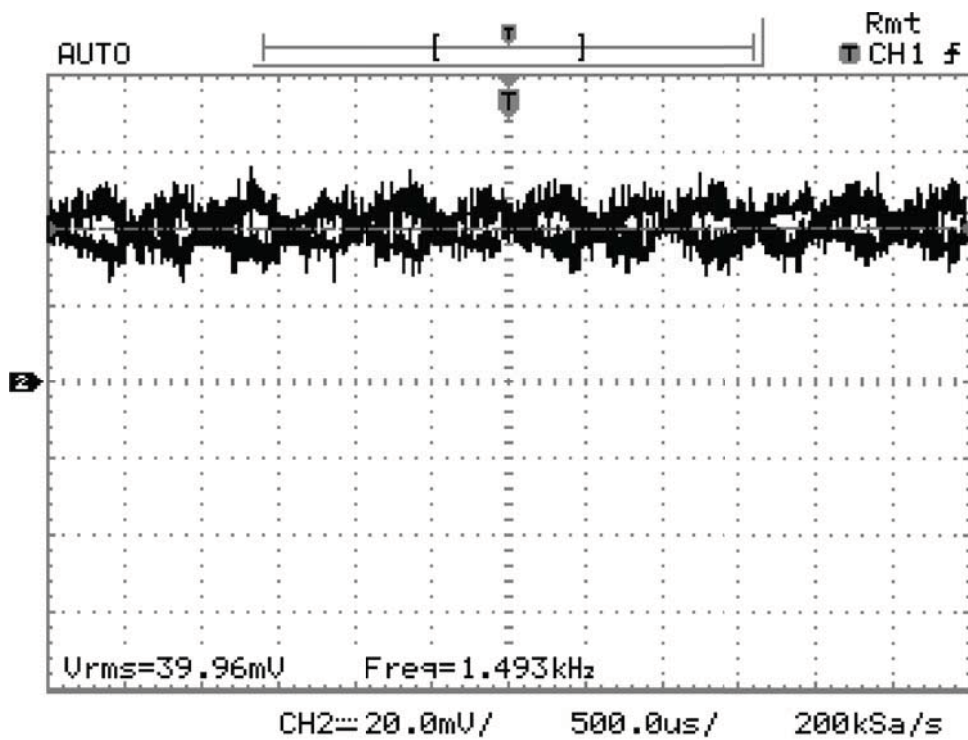


Figura 4.17 – Gráfico do osciloscópio para faixa de 970 nm do sinal do sensor, com interferência luminosa.

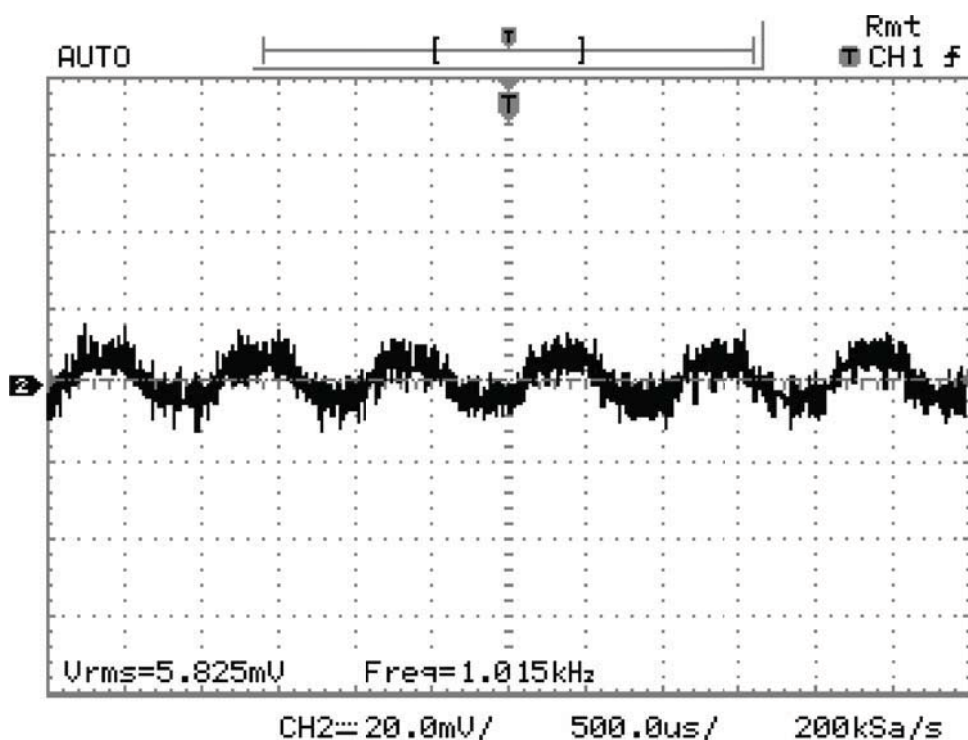


Figura 4.18 – Gráfico do osciloscópio para faixa de 970 nm depois do filtro passa-alta, sem interferência luminosa.

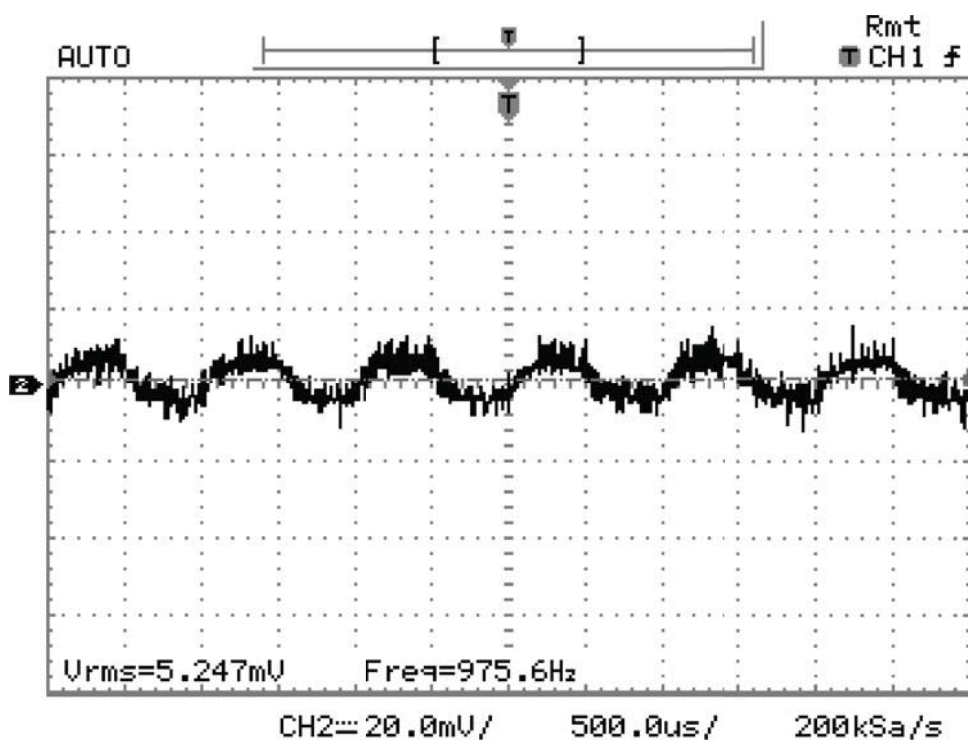
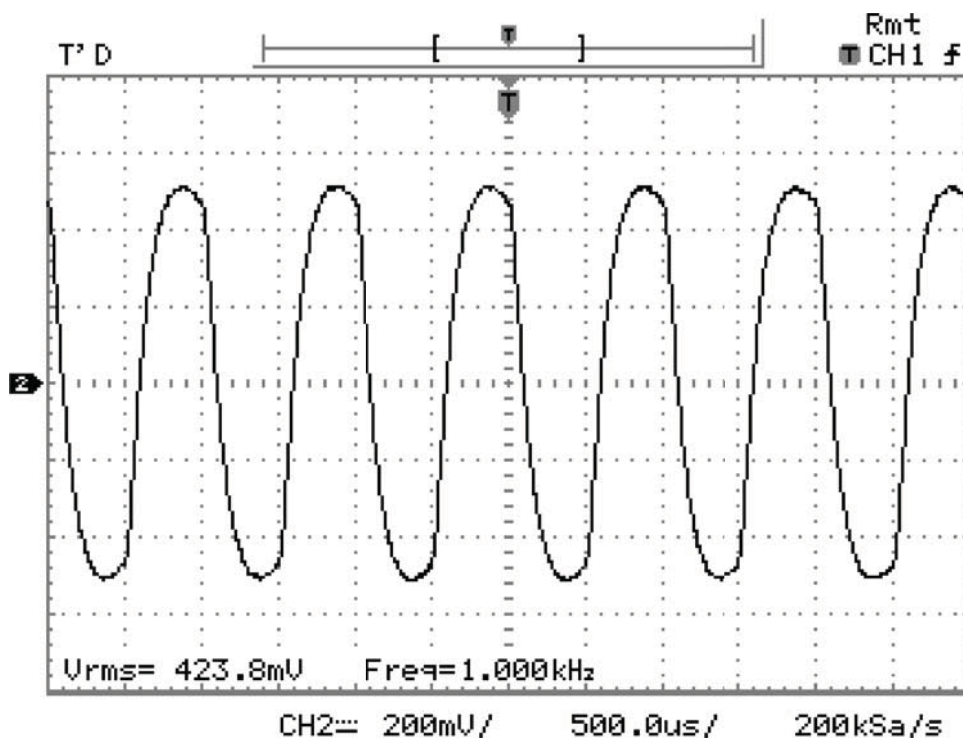


Figura 4.19 – Gráfico do osciloscópio para faixa de 970 nm depois do filtro passa-alta, com interferência luminosa.

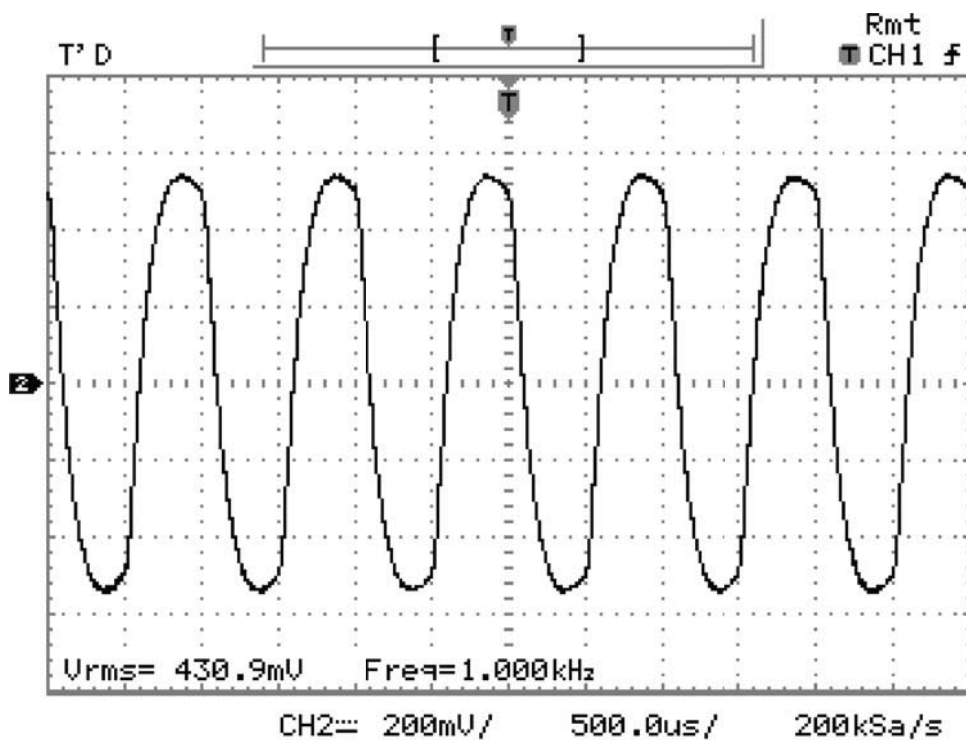
e 4.21.



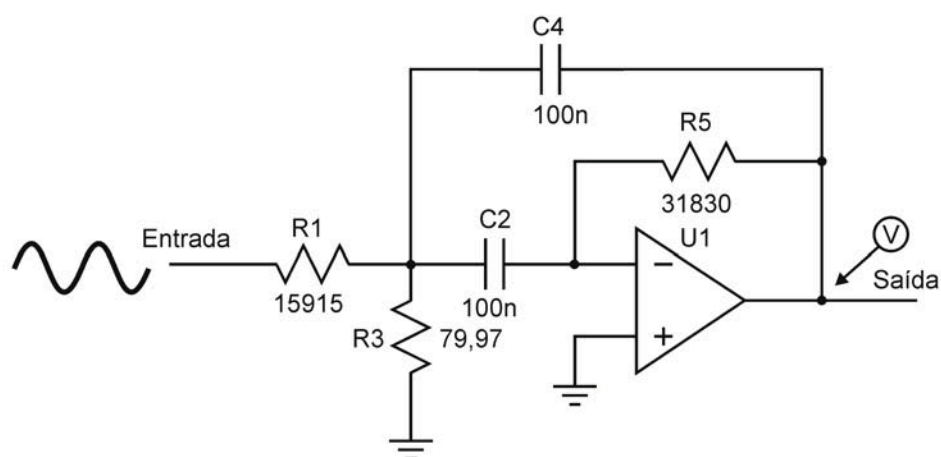
**Figura 4.20** – Gráfico do osciloscópio para faixa de 970 nm, depois da amplificação, sem interferência luminosa.

Com o filtro passa-faixa, a resposta do circuito é melhorada e é apresentado nas Figuras 4.23 e 4.24, representando a medição sem e com interferência luminosa respectivamente.

Para analisar a performance do circuito de detecção de pico, são apresentados os gráficos das Figuras 4.26 e 4.27 para as medições sem e com interferência luminosa. Estes gráficos representam a imunidade do circuito a interferência luminosa, obtendo boa estabilidade. Já na Figura 4.28, é demonstrado a precisão do detector de pico, com as formas de onda da entrada e da saída do circuito de detecção de pico. Visualiza-se neste gráfico que a tensão do detector de pico é muito próxima da tensão da onda senoidal.



**Figura 4.21** – Gráfico do osciloscópio para faixa de 970 nm, depois da amplificação, com interferência luminosa.



**Figura 4.22** – Indicação no circuito do local da aquisição do gráfico pelo osciloscópio - filtro passa-faixa.

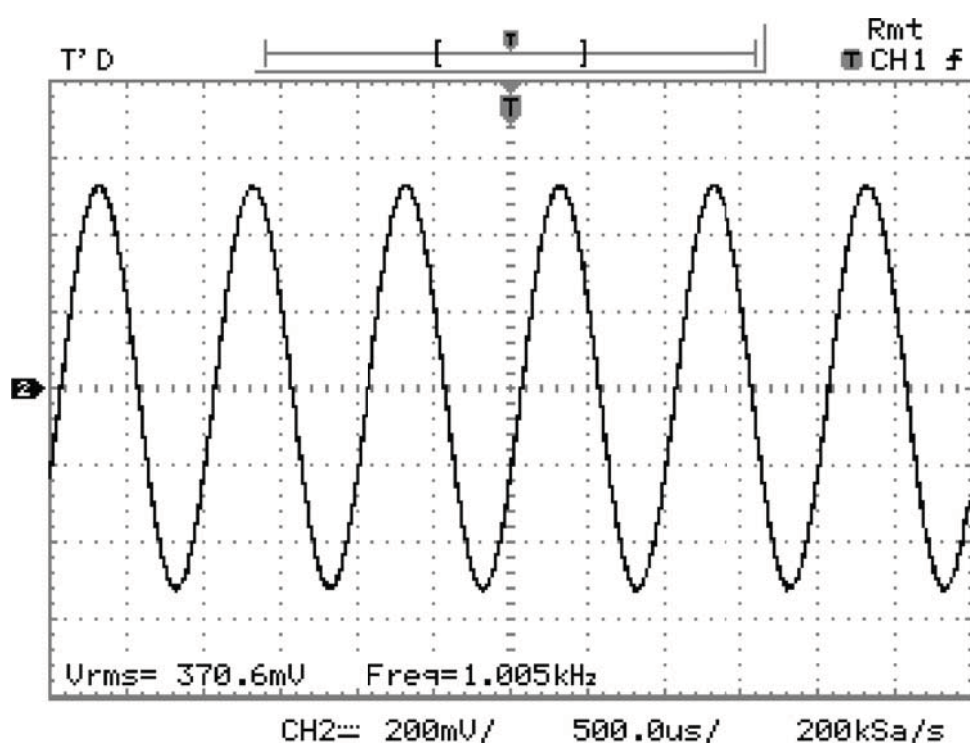


Figura 4.23 – Gráfico do osciloscópio para faixa de 970 nm, depois do filtro passas-faixa, sem interferência luminosa.

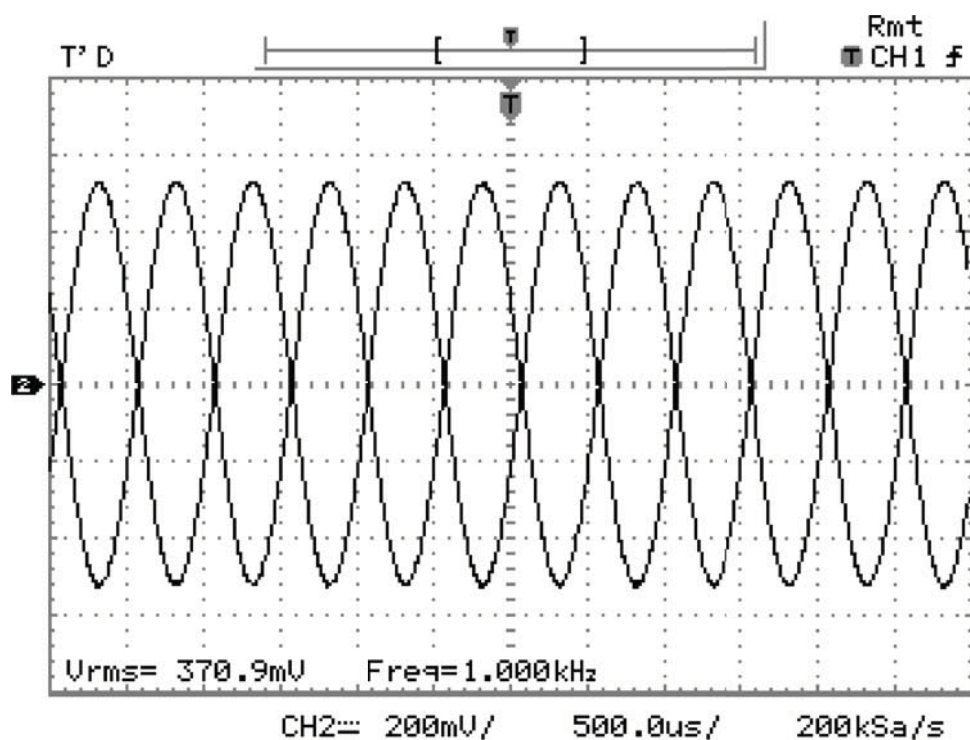
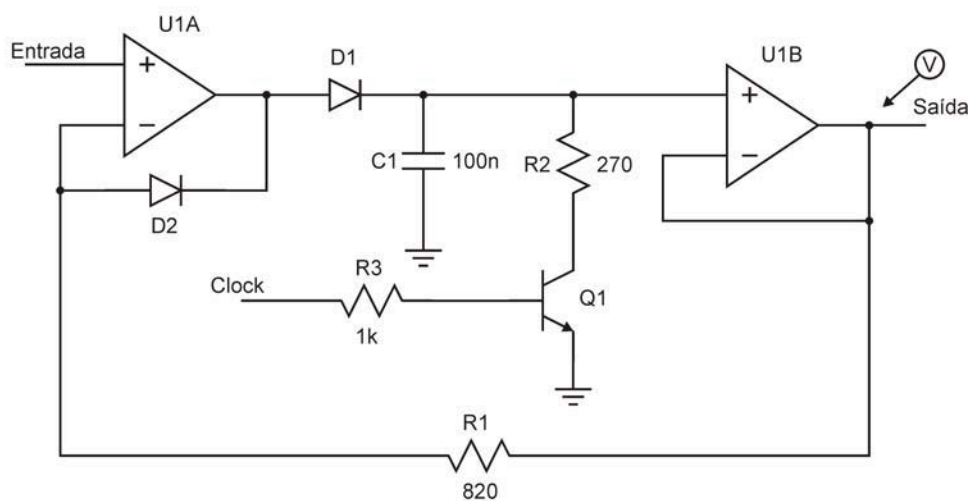
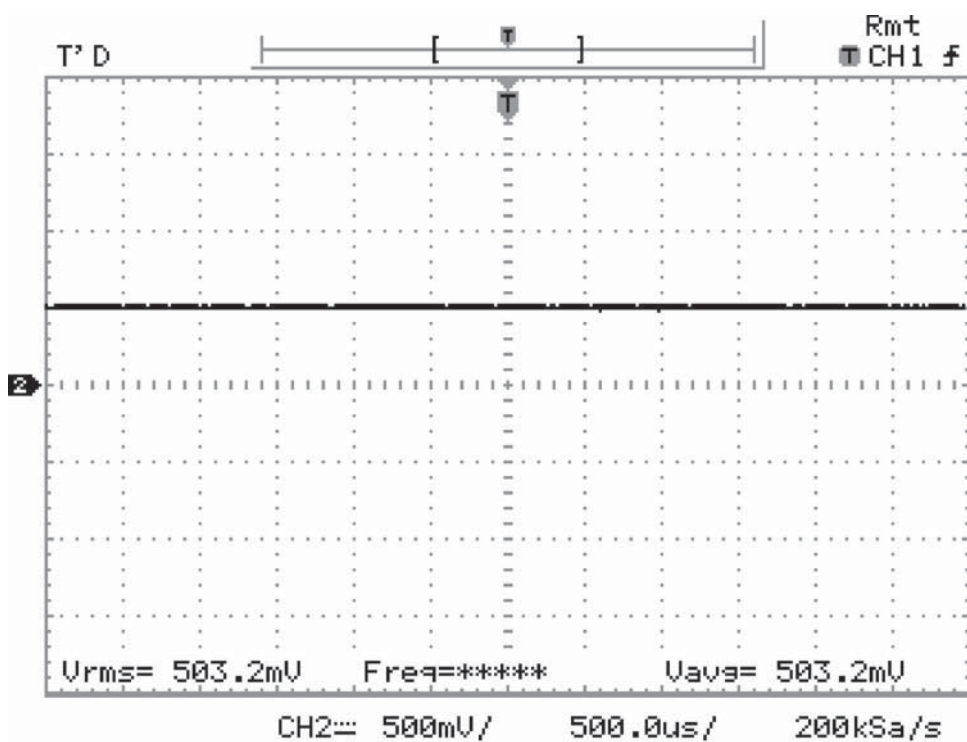


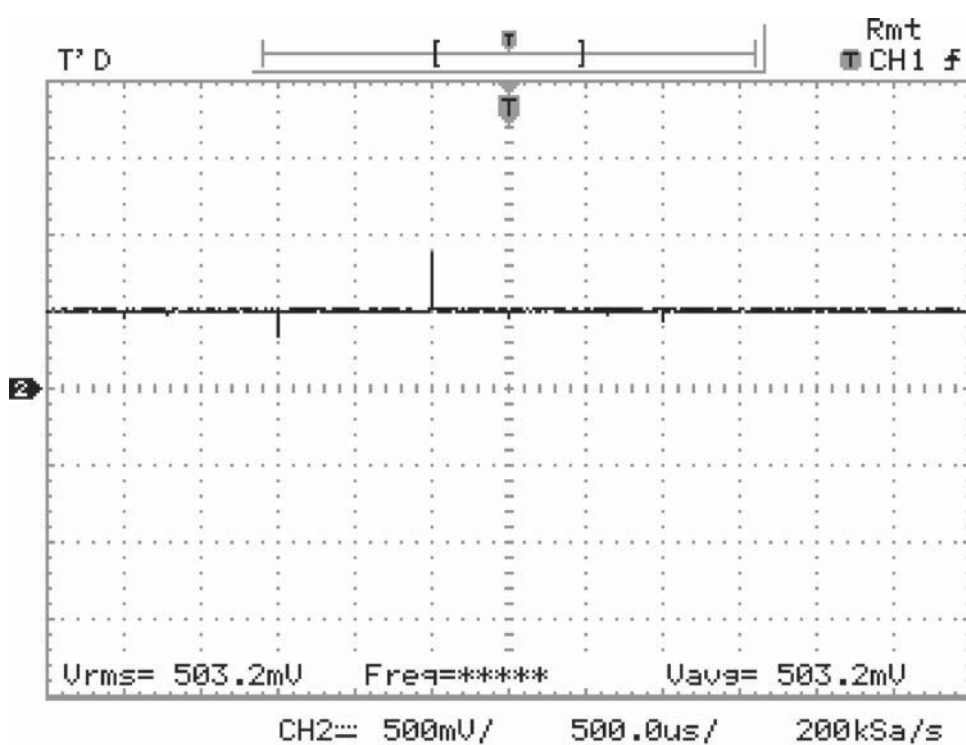
Figura 4.24 – Gráfico do osciloscópio para faixa de 970 nm, depois do filtro passa-faixa, com interferência luminosa.



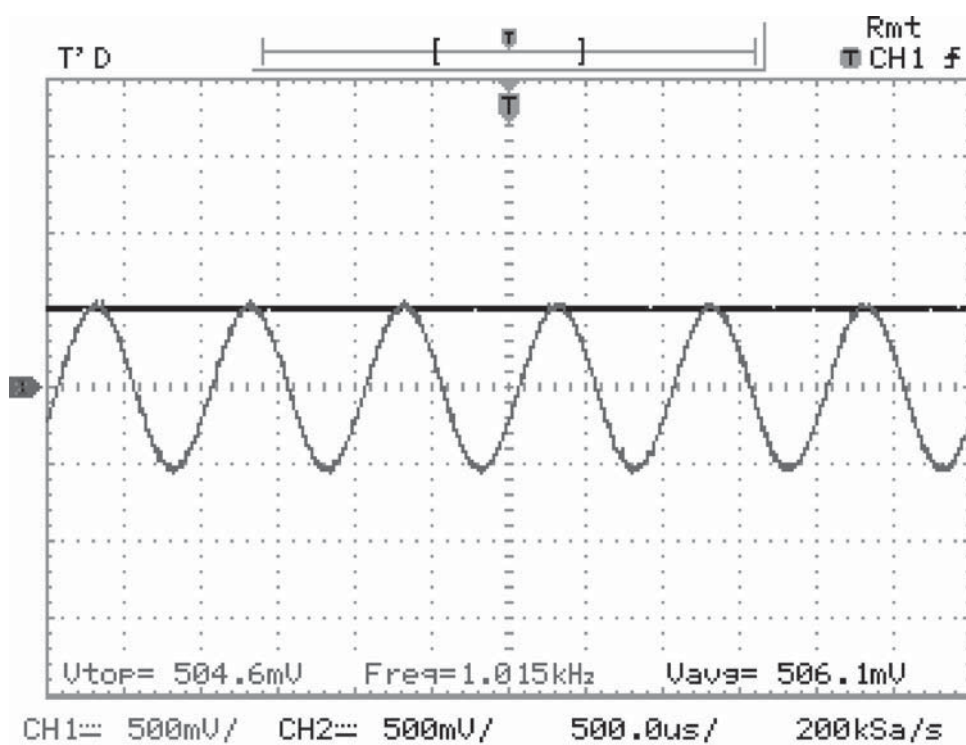
**Figura 4.25** – Indicação no circuito do local da aquisição do gráfico pelo osciloscópio – detector de pico.



**Figura 4.26** – Gráfico do osciloscópio para faixa de 970 nm, depois do detector de pico, sem interferência luminosa.



**Figura 4.27** – Gráfico do osciloscópio para faixa de 970 nm, depois do detector de pico, com interferência luminosa.



**Figura 4.28** – Gráfico do osciloscópio para faixa de 970 nm, com o comparativo da entrada do detector de pico e a saída.

---

## CONCLUSÕES

---

A medição e o controle da umidade são de grande importância para diversas áreas da indústria, tanto para manutenção da qualidade dos produtos no armazenamento, quanto para garantir a qualidade final do produto na linha de produção, assim como para não ocorrerem perdas e por conseguinte, obter um lucro melhor na venda.

Os medidores *on-line* existentes possuem restrições de utilização, que limitam muito o uso nas indústrias. Dentre essas restrições estão: a interferência de fontes luminosas externas, impedimento na fixação em locais que apresentam vibrações e variações na temperatura ambiente, grande volume e o alto custo desses equipamentos.

Neste trabalho, foi apresentado um transdutor de umidade que poderá ser utilizado para desenvolver um medidor de umidade *on-line* para solucionar a maioria dos problemas apresentados anteriormente. Tal transdutor consiste na utilização de semicondutores (LEDs), ao invés de lâmpadas incandescentes, pois não necessitam de obturadores mecânicos para modular a luz emitida e nem de filtros para seleção do comprimento de onda e, portanto, resolve o problema de volume, limitações na fixação e diminuindo o custo.

A utilização de mais de um comprimento de onda de absorção da água e um sistema de amplificação e condicionamento de sinais solucionam o problema de interferência externa. Além disso, um controle rigoroso na temperatura, com a ajuda de um elemento Peltier, soluciona o problema de variações de temperatura.

Desta forma, o transdutor desenvolvido será muito útil para melhorar a performance dos medidores de umidade por infravermelho, apresentará uma opção de aquisição para pequenas indústrias e, conseqüentemente, aumentará a automação nas linhas de produção com a diminuição das perdas.

## 5.1 Propostas Futuras

As propostas para melhoria futuras do sistema são apresentadas nesta seção.

É deixado como implementação futura os seguintes itens que são considerados importantes para melhoria do sistema, onde alguns são ilustrados na Figura 5.1.

- Aquisição e implantação do comprimento de onda de referência, citado na sub-seção 2.2.3 para comparar os resultados.
- Diminuir o comprimento do tubo para aumentar a intensidade dos sinais que incidem no receptor, como comentado anteriormente (vide sub-seção 4.2.1).
- Substituir o sistema de dissipação a ar por um sistema de dissipação a água, como citado na sub-seção 4.2.3.
- Aquisição de um Elemento Peltier com maior número de estágios (para diminuir a corrente necessária para o resfriamento/aquecimento do sistema).
- Troca da fonte atual por uma fonte chaveada, para diminuir ainda mais o tamanho e o peso do sistema.
- Substituição do sistema de controle do Elemento Peltier por um sistema com controle PWM.
- Calibração do sistema (verificar a necessidade de cálculo de estatística multivariada).

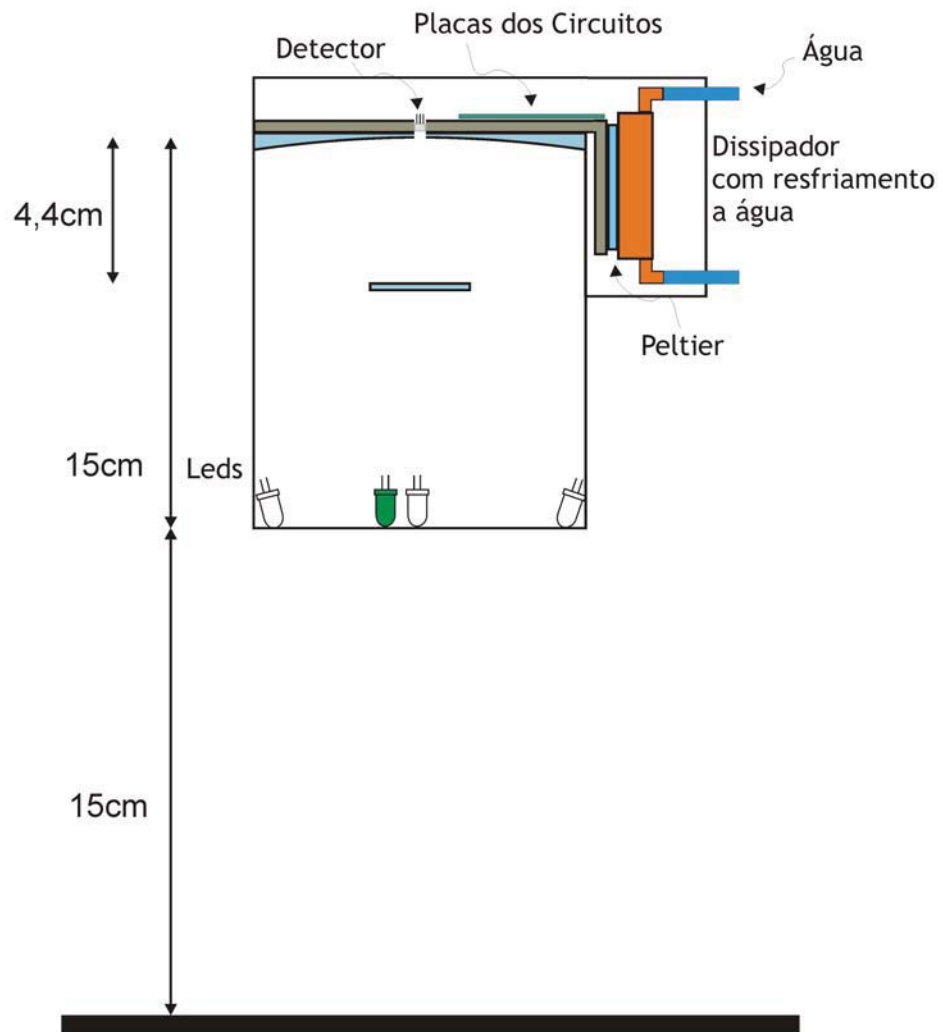


Figura 5.1 – Proposta para montagem futura.

---

## Referências

---

- ABIC (2008). Estatísticas - exportações. [http://www.abic.com.br/estat\\_exporta\\_ppaises.html](http://www.abic.com.br/estat_exporta_ppaises.html). Associação Brasileira da Indústria de Café - acessado em março/2008.
- ABIOVE (2008a). Complexo soja - exportações. [http://www.abiove.com.br/exporta\\_br.html](http://www.abiove.com.br/exporta_br.html). Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais - acessado em março/2008.
- ABIOVE (2008b). Complexo soja - processamento mensal de soja. [http://www.abiove.com.br/processamento\\_br.html](http://www.abiove.com.br/processamento_br.html). Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais - acessado em março/2008.
- Almeida, F. d. A. C., Alves, N. M. C., Gomes, J. P., e Silva, D. R. S. (2007). Determinação do teor de umidade limite de sementes de endro (*Anethum graveolens*) para crioconservação. *Revista de Biologia e Ciências da Terra.*, 7(2):153–159.
- Amoodeh, M. T., Khoshtaghaza, M. H., e Minaei, S. (2006). Acoustic on-line grain moisture meter. *Computers and Electronics in Agriculture.*, 52(2):71–78.
- Araújo, E. G. d. e Fernandes, N. S. (2007). Determinação da umidade em farinha de trigo utilizando o método clássico de análise e a termogravimetria (TG). Em *I Congresso Norte-Nordeste de Química.*, página T78.
- Araujo, A. M. (2007). Monitoramento de processos em tempo real via espectrofotometria no infravermelho próximo. Dissertação de Mestrado, Universidade Tiradentes - UNIT, Brasil.
- Berbert, P. A., Molina, M. A. B., Carlesso, V. O., e Oliveira, M. T. R. (2007). Determinação do teor de Água de sementes de café empregando o método da capacitância em radiofrequências. *Revista Brasileira de Sementes.*, 29(2):159–170.
- Berbert, P. A., Souza, E. F., Faroni, L. R. D., Melo, E. C., Queiroz, D. M., e Stenning, B. C. (1999). Utilização de propriedades dielétricas na determinação do teor de umidade do trigo. *Eng. Agríc. Jaboticabal.*, 19(2):238–247.
- Burns, D. A. e Ciurczak, E. W. (2001). *Handbook of Near Infrared Analysis*. Marcel Dekker Inc.
- Claudio, H. C., Cheng, Y., Fuentes, D. A., Gamon, J. A., Luo, H., Oechel, W., Qiu, H. L., Rahman, A. F., e Sims, D. A. (2006). Monitoring drought effects on vegetation water content and fluxes in chparral with the 970nm water band index. *Remote Sensing of Environment*, 103(2006):304–311.
- Coates, J. P. (1999). A review of current and new technologies used in instrumentation for

- industrial vibrational spectroscopy. *Spectroscopy*, 14(10):20–34.
- Curcio, J. A. e Petty, C. C. (1951). The near infrared absorption spectrum of liquid water. *Journal of Optical Society of America.*, 41:302–304.
- Curran, P. J. (1989). Remote sensing of foliar chemistry. *Remote Sensing of Environment.*, 30:271–278.
- Fensholt, R. e Sandholt, I. (2003). Derivation of a shortwave infrared water stress index from MODIS near- and shortwave infrared data in a semiarid environment. *Remote Sensing of Environment.*, 87(1):111–121.
- Ferrão, M. F. (2000). *Aplicação de Técnicas Espectroscópicas de Reflexão no Infravermelho no Controle de Qualidade de Farinha de Trigo*. Tese de Doutorado, Instituto de Química - UNICAMP, Brasil.
- Fogaça, C. A., Malavasi, M. M., Malavasi, U. C., e Helmich, P. R. (2004). Comparação de metodologias para quantificação do grau de umidade de sementes florestais categorizadas por tamanho. *Scientia Agraria Paranaensis.*, 3(1):15–24.
- Gao, B. C. (1996). NDWI - a normalized difference index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment.*, 52:155–162.
- Garcia-Amoedo, L. H. e Almeida-Muradian, L. B. d. (2002). Comparação de metodologias para determinação de umidade em geléia real. *Química Nova.*, 25(4):676–679.
- Goneli, A. L. D., Corrêa, P. C., Resende, O., e Reis Neto, S. A. d. (2007). Estudo da difusão de umidade em grãos de trigo durante a secagem. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 27(1):135–140.
- Hudson Jr, R. D. (1969). *Infrared System Engineering*. John Wiley & Sons, Inc., 1ª edição.
- LABGIS (2008). Conceitos básicos. [http://www.fgel.uerj.br/labgis/gis\\_atualizada/sensoriamento/radiacao.html](http://www.fgel.uerj.br/labgis/gis_atualizada/sensoriamento/radiacao.html). LABGIS - Laboratório de Geoprocessamento do Departamento de Geologia Aplicada da FGEL - UERJ - Acessado em abril/2009.
- Lestander, T. (2003). *Multivariate NIR Studies of Seed-Water Interaction in Scots Pine Seeds (Pinus sylvestris L.)*. Tese de Doutorado, Swedish University of Agricultural Sciences, Umea, Sweden.
- Lovatelli, C. (2005). Perspectivas para soja 2020. Em *International Association of Seed Crushers.*, Mumbai - India.
- Luz, C. d., Baudet, L., e Troger, F. (1993). Comparação de métodos diretos para determinação do teor de Água de sementes. *Revista Brasileira de Sementes.*, 15(2):157–163.
- Luz, E. R. d. (2003). Predição de propriedades de gasolinas usando espectroscopia FTIR e regressão por mínimos quadrados parciais. Dissertação de Mestrado, Pontífca Universidade Católica - PUC/RJ., Brasil.
- Luz, M. L. (2002). Medidores de umidade. *SEED News*, 6(1).
- MAPA (1983). Normas de qualidade para classificação e comercialização da soja em grão. Portaria nº 262 de 23 de novembro, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Brasil.

- MAPA (1993). Norma de identidade, qualidade, embalagem, marcação e apresentação do farelo de soja. Portaria n° 795 de 15 de dezembro, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Brasil.
- MAPA (2003). Regulamento técnico de identidade e de qualidade para a classificação do café beneficiado grão cru. Instrução normativa n° 8 de 11 de junho, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Brasil.
- McIntosh, R. B. e Casada, M. E. (2008). Fringing field capacitance sensor for measuring the moisture content of agricultural commodities. *IEEE Sensor Journal.*, 8(3):240–247.
- Mendham, J., Denney, R. C., Barnes, J. D., e Thomas, M. J. K. V. (2002). *Análise Química Quantitativa*. LTC Editora, Rio de Janeiro, 6ª edição.
- Mesić, M., Čorluka, V., e Valter, Z. (2005). Analysis of some parameters influencing moisture quantity measurements in wheat with NIR technique. Em *18th International Conference on Applied Electromagnetics and Communications, 2005. ICECom 2005.*, pp. 1–4.
- Mo, X., Liu, S., Lin, Z., e Zhao, W. (2004). Simulating temporal and spatial variation of evapotranspiration over the Lushi basin. *Journal of Hydrology.*, 285(1):125–142.
- National (2000). LM35 precision centigrade temperature sensors. Datasheet, National Semiconductor.
- Nelson, S. O., Kraszewski, A. W., Trabelsi, S., e Lawrence, K. C. (2000). Using cereal grain permittivity for sensing moisture content. *IEEE Transactions On Instrumentation and Measurement.*, 49(3):470–475.
- Nery, M. C., Carvalho, M. L. M. d., e Oliveira, L. M. d. (2004). Determinação do grau de umidade de sementes de ipê-do-cerrado *Tabebuia ochracea* ((cham.) standl.) pelos métodos de estufa e forno de microondas. *Ciênc. agrotec.*, 28(6):1299–1305.
- Oliveira, F. F. C. (2006). Modelos de calibração multivariada associados à espectroscopia vibracional para análise de misturas diesel - Óleos vegetais. Dissertação de Mestrado, Instituto de Química - UNB, Brasil.
- Osborne, B. G. (1981). Principles and practice of near infra-red (NIR) reflectance analysis. *International Journal of Food Science & Technology*, 16(1):13–19.
- Peñuelas, J., Filella, I., Biel, C., Sweeney, L., e Save, R. (1993). The reflectance at the 950 – 970 nm region as an indicator of plant water status. *International Journal of Remote Sensing.*, 14:1887–1905.
- Peñuelas, J., Filella, I., e Sweeney, L. (1996). Cell wall elasticity and water index ( $R_{970nm}/R_{900nm}$ ) in wheat under different nitrogen availabilities. *International Journal of Remote Sensing.*, 17:373–382.
- Pinho, M. d. S., Tilmann, M. A. A., e Lopes, M. S. (2007). Avaliação na determinação do grau de umidade das sementes de arroz e soja pelo método da estufa. Em *XVI Congresso de Iniciação Científica e IX Encontro de Pós-Graduação. Anais do XVI CIC.*, página CA\_00717.
- Pu, R., Ge, S., Kelly, N. M., e Gong, P. (2003). Spectral absorption features as indicators of

- water status in coast live oak (*Quercus agrifolia*) leaves. *International Journal of Remote Sensing*, 24(9):1799–1810.
- Roberts, D. A., Brown, K., Green, R. O., Ustin, S. L., e Hinckley, T. (1998). Investigating the relationships between liquid water and leaf area in clonal *Populus*. Em *Summaries of the 7th annual JPL Earth Science Workshop.*, pp. 335–344, Pasadena, CA. JPL Publication.
- Segtnan, V. H., Sasic, S., Isaksson, T., e Ozaki, Y. (2001). Studies on the structure of water using two-dimensional near-infrared correlation spectroscopy and principal component analysis. *Analytical Chemistry.*, 73:3153–3161.
- Serrano, L., Ustin, S. L. ando Roberts, D. A., Gamon, J. A., e Peñuelas, J. (2000). Deriving water content of chaparral vegetation from AVIRIS data. *Remote Sensing of Environment.*, 74:570–581.
- Sims, D. A. e Gamon, J. A. (2003). Estimation of vegetation water content and photosynthetic tissue area from spectral reflectance: a comparison of indices based on liquid water and chlorophyll absorption features. *Remote Sensing of Environment.*, 84(4):526–537.
- Skoog, D. A., Holler, F. J., e Nieman, T. A. (2002). *Princípios de Análise Instrumental*. Editora Bookman, 5ª edição.
- Trabelsi, S. e Nelson, S. O. (2007). Unified microwave moisture sensing technique for grain and seed. *Measurement Science and Technology.*, 18(4):997–1003.
- UFPA-ICEN (2008). Coulometria. <http://www.ufpa.br/ccen/quimica/coulometria.htm>. Departamento de Química da Universidade Federal do Pará - Acessado em novembro/2008.
- Valderrama, P. (2005). Avaliação de figuras de mérito em calibração multivariada na determinação de parâmetros de controle de qualidade em indústria alcooleira por espectroscopia no infravermelho próximo. Dissertação de Mestrado, Instituto de Química - UNICAMP, Brasil.
- Valentini, S. R. T., Castro, M. F. P. M. d., e Almeida, F. H. d. (1998). Determinação do teor de umidade de milho utilizando aparelho de microondas. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 18(2).
- Volmer, M. (2001). *Infrared spectroscopy in clinical chemistry, using chemometric calibration techniques*. Tese de Doutorado, Faculty of Medical Sciences - University of Groningen, Netherlands.
- Williams, P. e Norris, K. (1998). *Near-Infrared Technology in the Agricultural and Food Industries*. AACC Press.
- Yamasoe, M. A. (2006). Apostila da Disciplina Meteorologia Física II - ACA 0326. Relatório técnico, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo.
- Zarco-Tejada, P. J., Rueda, C. A., e Ustin, S. L. (2003). Water content estimation in vegetation with MODIS reflectance data and model inversion models. *Remote Sensing of Environment.*, 85:109–124.

---

APÊNDICE A

---

# ARTIGO

---

Artigo aceito no "*World Congress of Computers in Agriculture and Natural Resources, 2009*"(WCCA) e a programação do congresso.

# An online humidity transducer based on near-infrared radiation

Diogo K. Takayama<sup>1</sup>; José A. de França<sup>1</sup>; Dari O. Togninho Filho<sup>2</sup>; Maria B. de Moraes França<sup>1</sup>; Marcelo G. Canteri<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Elétrica, <sup>2</sup>Departamento de Física, <sup>3</sup>Departamento de Agronomia, Universidade Estadual de Londrina, Cx postal 6025, CEP 86051-980, Londrina, PR, Brazil.

*Abstract. In various sectors, humidity measurement is a crucial task, for instance in the food industry, grain processing/crushing, sugar plants, etc. The conventional humidity measurement method requires a lab sample analysis. This is a destructive, expensive and slow process. Besides, as raw material humidity may vary considerably during the day, many measurements are required throughout the period. On the other hand, with an online humidity measurement process, the water amount is known instantly, without physical contact with the sample. Thus, the production process control can be carried out without losses, with maximum profit and quality. In this work, a humidity transducer based on near-infrared radiation is presented. During its development, the main project focus was cost reduction. Due to this, LEDs were used for producing infrared radiation. This has eliminated typical problems in conventional online measurement tools, such as reduced useful life and too many moving parts which may complicate equipment installation in vibrating places. Through the inclusion of a temperature control system, problems with ambient temperature variation were solved. The equipment was tested on a laboratory, measuring coffee powder humidity. However, the system can be easily adapted to measure humidity on a variety of other substances. Our tests indicate that the proposed transducer has a high sensitivity and robustness to temperature variations and external radiation sources (solar and incandescent light, etc.) Besides, the measured equipment uncertainty is in the order of 0.2 %.*

*Keywords: Measurement of Humidity, Near Infrared, NIR, on-line humidity meter.*

## Introduction

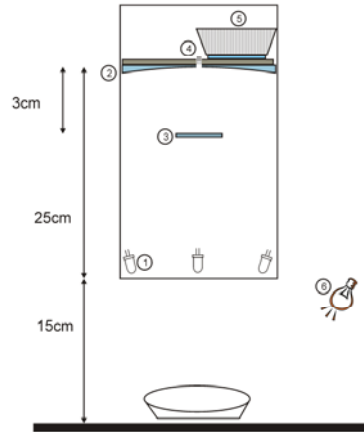
Grains, seeds and food are very perishable, but can be stored for a long time if treated adequately. Various factors are involved in maintaining product quality, but chief among them is humidity, since water is responsible for biological activity and chemical and physical changes. Reducing humidity therefore implies in the reduction of biological activity, the pace of chemical reactions and the development of microorganisms (Goneli et al., 2007). As humidity generally varies throughout the production process, ideally there would be continuous measurement of humidity across the entire production line. Instruments that can be employed to this end are termed "on-line humidity meter".

Commercial on-line meters don't work well in low or high temperatures. Hence, a transducer that is capable of measuring humidity directly in the production line, instantly and immunely to large variations in temperature, allows for immediate process adjustment to the desired value, preventing losses and reprocessing of product. If in addition the measurement system is small, low-cost and easily adaptable to any environment, it is feasible to install a series of transducers at various stages of the production process, reducing costs related to chemical measurements, infrastructure and labor, facilitating measurement and ensuring a greater control of the productive process.

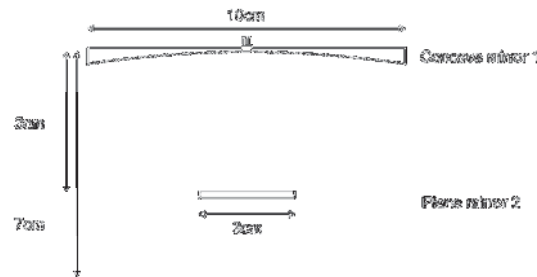
In this context, we present a humidity transducer based on diffuse reflection in the near-infrared band. This transducer senses humidity through the identification of water molecule concentration using the principle of absorption/reflection. Absorption consists in the loss of energy of electromagnetic radiation going through a medium. Molecules in this medium absorb energy and change to an excited state, displaying specific transitions of its energetic conformation. These transitions supply a "signature" of the kind of molecule that exists in a certain medium, and by observing the reduction in intensity of the electromagnetic signal for the wavelengths correlated to these transitions, one can estimate the concentration of these molecules (Araujo, 2007). This is a common process which happens in different mediums such as solids, liquids and gases.

### Proposed System

Unlike conventional systems which employ incandescent lamps as infrared radiation sources, the proposed system (Figure 1) uses LEDs (1) to emit radiation in water's absorption wavelengths (970 nm, 1200 nm and 1450 nm). This radiation shines over the samples and is absorbed by water molecules. The remaining non-absorbed radiation is reflected diffusely and collimated by a concave mirror (2) which focuses these radiations in a plane mirror (3) located 3 cm away from the focal distance of the concave mirror. This plane mirror reflects the focused radiation to the InGaAs-type optical sensor (4). The sensor is located in the center of the concave mirror, where a temperature control system (5) for the optical apparatus is installed. This is necessary due to the radiation sensor's high sensitivity to temperature changes.



**Figure 1: Diagram of a tree configuration.**



**Figure 2: Mirror arrangement employed in the prototype.**

The use of LEDs as an infrared radiation source has the advantage of not radiating heat, thus solving the problem of heating caused by incandescent lamps, decreasing the size and increasing the equipment's useful life, as an incandescent lamp has a shorter useful life. Another advantage of using LEDs is that it becomes possible to modulate the emitted radiation, removing the need for a mechanical chopper. This solves the problem of moving parts and by consequence the limitation of installation in places subject to vibration. Also, due to the light-emitting semiconductor having a very narrow emission bandwidth with low opening angle (focusing the emitted radiation), it isn't necessary to employ filters to select the desired wavelength. This leads to a cost reduction in the equipment.

To improve the system's sensibility and reduce the equipment's size, a mirror arrangement was employed as in Figure 2. A concave mirror is employed (Mirror 1) with a 10 cm diameter and 7 cm focal distance, as well as a plane mirror (Mirror 2) with 3 cm diameter. This arrangement also allows for fixing the sensor in a heat sink for heat exchange and temperature control, without getting in the way of the reflected radiation.

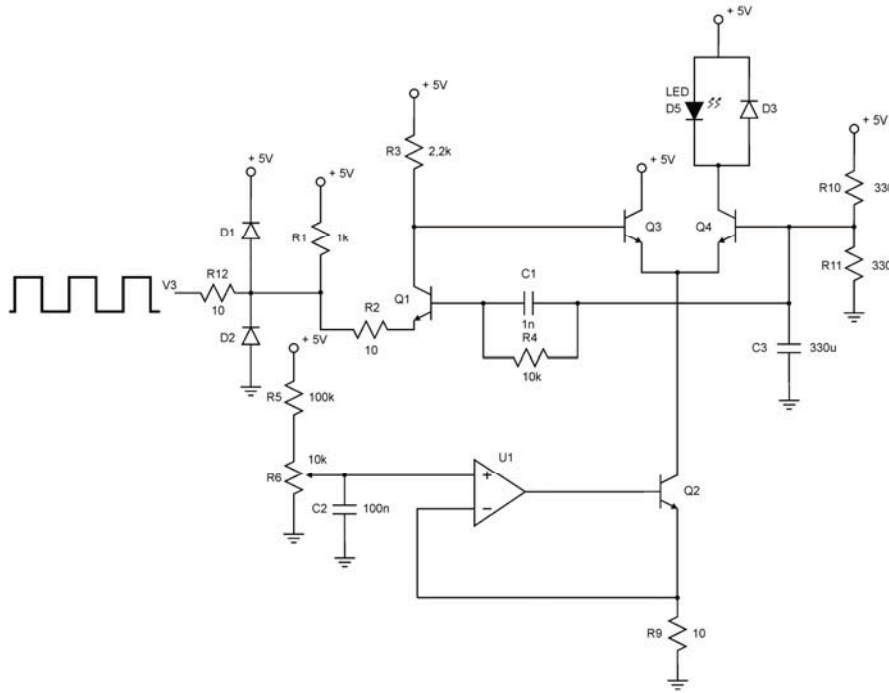


Figure 3: Circuit of the emitters.

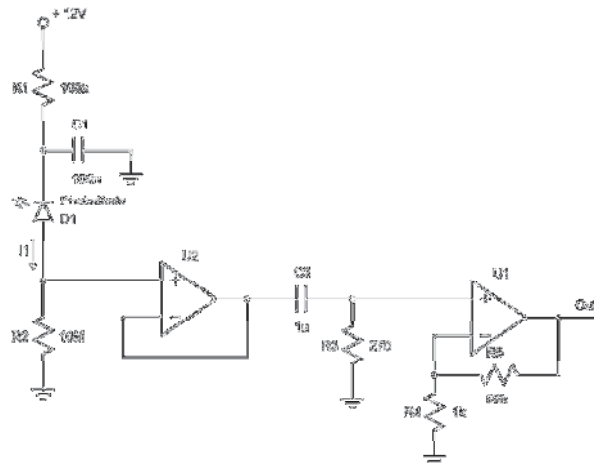


Figure 4: Circuit of the receiver.

Each of the three emitters used are triggered by circuits similar to that of Figure 3. In it, a microcontroller generates a TTL signal with 1 kHz frequency, which is used to control a current source that regulates the LEDs' emission power. The current source is based on the LM324 operational amplifier. The voltage in R6 determines the current in R9, which will be the same as Q2's emitter current.

The transistors Q3 and Q4 are connected as a differential pair. The emitters supply all current to Q2. Whichever transistor has higher base voltage will be responsible for supplying all current to Q2. When Q3's

base voltage is higher than Q4's base voltage, then Q2's current is supplied by Q3 through the voltage source. When Q4's base voltage is higher than Q3's base voltage, then Q2's current is supplied through Q4, which will drain current through the LED, activating it. In Figure 3 the emitters' block is presented.

Since the signal received by the sensors is very weak, being the result of diffuse reflection of light over the sample, an amplifier circuit is called for. This is shown in Figure 4. The circuit receives the sensor's signal, converts it to voltage, passes it through a high-pass filter to eliminate external interference (the desired signal is modulated while the interference signal is continuous) and applies a 100-fold gain to the original signal. Also, in Figure 4, the first operational amplifier (an OP07E) was used as a buffer so that the signal can pass through the filter. Capacitor C2 and resistor R3 are used to filter DC signals, so that only AC signals are amplified. Next, the filter is configured with a cutoff frequency of 600 Hz, to prevent interference from fluorescent lamps, whose reactors are supplied from mains power with a 60 Hz frequency and hence with 120 Hz harmonics. The second operational amplifier is configured in a non-inverting topology with a gain of 100.

After the circuit of Figure 4, a peak detector circuit is used. In it, the sampled peak is proportional to the amount of radiation received by the InGaAs sensor and corresponds to the output of the proposed transducer.

For temperature control, which was employed to keep the temperature of the InGaAs sensor at a constant 25 degrees Celsius, an LM35 temperature sensor was used along with a proportional controller implemented with an LM324 operational amplifier. The amplifier's output is applied to a Peltier element in contact with the sensor which cools or heats it.

### **Experimental results**

The developed transducer still needs to be calibrated. Calibration involves associating humidity values with voltage signals at the output of the infrared receiver circuits. It's necessary to perform a calibration for each kind of material of interest (soybean grains, sugar, paper, etc.) However, as shown next, it is already possible to evaluate the developed transducer in several aspects.

To perform tests, the chosen material was coffee powder, acquired in the local market of the town of Londrina, Paraná, Brazil. Samples were separated in portions, which were moistened with a varying quantity of water. Next, they were left at rest for about 2 hours to obtain an uniform humidity distribution. Also, in every case, for comparison with the proposed transducer, the reference method chosen for humidity calculation was the Brazilian standard oven method established by the Ministry of Agriculture, Livestock and Food Supply (Almeida et al., 2007; Fogaça et al., 2004; Luz et al., 1993; Nery et al., 2004; Pinho et al., 2007; Valentini et al., 1998), which is internationally recognized by International Seed Testing (ISTA) (Fogaça et al., 2004; Luz et al., 1993; Nelson et al., 2000; Nery et al., 2004).

For acquisition of transducer output signals, a workbench precision 6.5 digit multimeter was employed, plus a virtual instrument developed with LabVIEW software. The data acquisition program allows for configuring the resolution and number of samples, and saves the data in a text file for later analysis.

During measurements, samples were placed in glass jars in a sufficient amount to ensure complete coverage (to avoid radiation reflection in the glass) and placed in the center of the tube, about 15 cm away from the emitters.

Next we present test results.

#### **Sensitivity test**

In this test, we aim to evaluate the voltage variability in the output of the transducer as a function of humidity. To this end, we performed a series of measurements of the same sample, with a ten minute interval between each measurement. In these tests, we performed 2,000 acquisitions for each water absorption band, with a sampling rate of 1 kHz. Next, the median of the 2,000 acquired points was used to generate a single result, in order to visualize the characteristic curve with the three water absorption bands. This plot is presented in Figure 5 with different humidity values. An inversely proportional variation of signal amplitude with humidity can be verified. For the first water absorption band, amplitude variation is of about 3.52 mV per 1% of change in humidity, with a standard deviation of 0.00032 mV. In the second band, the variation is of 2.94 mV with standard deviation 0.00042 mV. At last, in the third band, variation is of 3.69 mV with standard deviation 0.00068 mV. However, if deemed necessary, sensitivity can be increased by adjusting the gain of the receiver circuit.

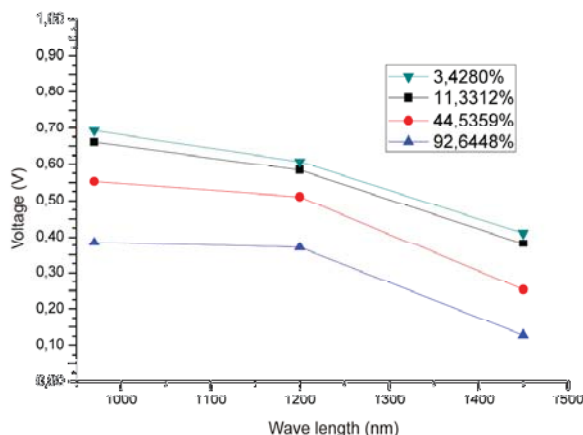
#### **Repeatability evaluation**

In this test, the system's capacity to produce the same results for the same sample was evaluated. Initially the measurement's time stability was looked at. In order to analyze the repeatability of these data, after performing measurements in the three bands, a period of 10 minutes was allowed to elapse before new

measurements were carried out. Another measurement was performed after shutting down the system and, after turning it on again, letting another 10 minutes elapse. In this test, using a sample with 9.1% humidity, for the 970 nm and 1450 nm bands, a variation in the transducer output of 0.31%, 0.10% and 0.04%, respectively, was observed. The same test was repeated for other amounts of humidity and the results were very close. This shows that the transducer has great repeatability properties and is very stable.

#### **Evaluation of immunity to light interference**

To analyze the influence of external radiation sources in the proposed system, a 5W/12 V incandescent lamp was employed (6) according to Figure 1. This lamp was used to assess differences in measurements in the presence or absence of external radiation. For samples with 9.1% and 3.9% humidity, a difference of merely 500 uV was observed in the transducer outputs. This shows that the proposed system has good immunity to external light interference, removing the limitation of installing the equipment in open locations.



**Figure 5: Values obtained from the proposed equipment in the 3 water absorption bands.**

### **Conclusions**

Humidity measurement and control are highly important to many areas of industry, for ensuring the maintenance of product quality in storage as well as to ensure the quality of the final product in the production process, and also to prevent losses and hence obtain better profit.

Existing on-line humidity transducers have usage restrictions which severely limit their usefulness in industries. Among these restrictions are: interference of external light sources, impossibility of being installed in locations with vibration and environment temperature variation, large size and high cost.

In this paper, we presented a humidity transducer which can be employed in the development of an on-line humidity meter which solves most of the aforementioned problems. This transducer's operating principle is based in the use of semiconductors (LEDs), in place of incandescent lamps which require mechanical choppers (to modulate emitted light) and optical filters (for wavelength selection), and hence solves the problems of size, installation limitations and also reduces cost.

As experimental results show, the use of multiple water absorption wavelengths, plus amplification and signal conditioning circuitry, solve the problem of external interference. Besides, temperature control using a Peltier element solves the problem of temperature variation. It follows that the developed transducer will be very useful to improve performance of infrared humidity measurement meters.

**Acknowledgements.** The authors would like to thank Fundação Araucária and PROPPG/UEL for their financial support.

### **References**

- Almeida, F. d. A. C., Alves, N. M. C., Gomes, J. P., and Silva, D. R. S. (2007). Determinação do teor de umidade limite de sementes de endro (*Anethum graveolens*) para crioconservação. *Revista de Biologia e Ciências da Terra*, 7(2):153–159.

- Araujo, A. M. (2007). Monitoramento de processos em tempo real via espectrofotometria no infravermelho próximo. Master's thesis, Universidade Tiradentes - UNIT, Brasil.
- Fogaça, C. A., Malavasi, M. M., Malavasi, U. C., and Helmich, P. R. (2004). Comparação de metodologias para quantificação do grau de umidade de sementes florestais categorizadas por tamanho. *Scientia Agraria Paranaensis*, 3(1):15–24.
- Goneli, A. L. D., Corrêa, P. C., Resende, O., and Reis Neto, S. A. d. (2007). Estudo da difusão de umidade em grãos de trigo durante a secagem. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 27(1):135–140.
- Luz, C. d., Baudet, L., and Troger, F. (1993). Comparação de métodos diretos para determinação do teor de Água de sementes. *Revista Brasileira de Sementes*, 15(2):157–163.
- Nelson, S. O., Kraszewski, A. W., Trabelsi, S., and Lawrence, K. C. (2000). Using cereal grain permittivity for sensing moisture content. *IEEE Transactions On Instrumentation and measurement*, 49(3):470–475.
- Nery, M. C., Carvalho, M. L. M. d., and Oliveira, L. M. d. (2004). Determinação do grau de umidade de sementes de ipê-do-cerrado *Tabebuia ochracea* ((cham.) standl.) pelos métodos de estufa e forno de microondas. *Ciênc. agrotec.*, 28(6):1299–1305.
- Pinho, M. d. S., Tilmann, M. A. A., and Lopes, M. S. (2007). Avaliação na determinação do grau de umidade das sementes de arroz e soja pelo método da estufa. In XVI Congresso de Iniciação Científica e IX Encontro de Pós-Graduação. *Anais do XVI CIC.*, page CA 00717.
- Valentini, S. R. T., Castro, M. F. P. M. d., and Almeida, F. H. d. (1998). Determinação do teor de umidade de milho utilizando aparelho de microondas. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 18(2).

## WCCA 2009 Program

<b>Sunday, June 21<sup>st</sup></b>		
4:30	6:30	Welcome Reception
<b>Monday, June 22<sup>nd</sup></b>		
8:30	9:30	ASABE Keynote
Control, Data Acquisition, Monitoring and Sensing (Room A)		
9:40		<b>An Online Humidity Transducer Based on Near-infrared Radiation</b> Diogo K. Takayama , José A. de França, Dari O. Toginho Filho , Maria B. de Moraes França, and Marcelo G. Canteri, Brazil
10:00		<b>Anemometer 3D Based on Ultrasound</b> Marcela H. Koyama, Rodger V. Pereira, Tiago P. da Silva, José A. de França, Marcelo G. Canteri, and Dari O. Toginho Filho, Brazil
10:20		<b>System of Microstations of Data Acquisition for Wireless Monitoring of the Microclimate in Crop Areas</b> José A. de França, Edson L. Burgo Júnior, Marcela H. Koyama, Rodger V. Pereira, Marcelo G. Canteri , and Maria B. de Moraes França, Brazil
10:40		<b>BREAK</b>
11:00		<b>Developing a Wireless Infrared Thermometer with a Narrow Field of View</b> Susan A. O'Shaughnessy, Martin A. Hebel, and Steven R. Evett, USA
11:20		<b>Evaluation of Sensor Readability and Thermal Relevance for RFID Temperature Tracking</b> C. Amador, and J.P. Emond, USA
11:40		<b>Low Cost Technology Applied to Thermometry of Grains</b> Marcelo Ferrasa, Marco Antonio Martin Biaggioni, and Marcelo Giovaneti Canteri, Brazil
12:00		<b>LUNCH (on your own)</b>
2:40		<b>Automatic Monitoring of Turkeys: A Vision-Based Approach to Detect and Analyse the Behaviour of Turkeys in Transport Cages Based on Ellipse Fitting</b> Ahmad Poursaberi, Anette Wichman, Claudia Bahr, Laura Hänninen, Matti Pastell, and Daniel Berckmans, Belgium