

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA  
UNIDADE DE PÓS-GRADUAÇÃO, EXTENSÃO E PESQUISA  
MESTRADO PROFISSIONAL EM GESTÃO E TECNOLOGIA  
EM SISTEMAS PRODUTIVOS

LUIZ FELIPE GONÇALVES DIB

TÍTULO: REFRAÔMETRO PELA TÉCNICA DE ÓPTICA ONDULATÓRIA

São Paulo  
Dezembro/2015

LUIZ FELIPE GONÇALVES DIB

TÍTULO: REFRACTÔMETRO PELA TÉCNICA DE ÓPTICA ONDULATÓRIA

Dissertação apresentada como exigência parcial para a obtenção do título de Mestre em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos do Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, no Programa de Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos, sob a orientação do Prof. Dr. Eduardo Acedo Barbosa

São Paulo  
Dezembro/2015

LUIZ FELIPE GONÇALVES DIB

TÍTULO: REFRAÔMETRO PELA TÉCNICA DE ÓPTICA ONDULATÓRIA

---

Prof. Dr. Eduardo Acedo Barbosa

---

Prof. Dr. Marcos Roberto da Rocha Gesualdi

---

Prof. Dr. Francisco Tadeu Degasperi

São Paulo, Abril de 2015

## **AGRADECIMENTOS**

A Pós Graduação do Centro Paula Sousa

Ao Prof. Dr. Eduardo Acedo Barbosa pela orientação.

Aos amigos Diego Conte Ayala Penalver e William Moraes Pavan Fulano, pelo apoio em assuntos técnicos na área mecânica.

Aos estagiários Petter Gimenes Lopes, Bruno Mendes Maeda e Pedro Sagiani pelas atividades de apoio.

Ao auxiliar docente do laboratório de eletrônica da Fatec-SP Israel Luiz Fernando Ribeiro pelo apoio em assuntos técnicos na área de eletrônica.

Ao Auxiliar docente do laboratório de CAD da Fatec-SP Daniel Carvalho Pimentel pelo apoio na área de informática.

Aos Professores Dr. Francisco Tadeu Degasperi, Dr. Humber Furlan, Dr. Luís da Silva Zambom e Dr. Marcelo Bariatto Andrade Fontes, por conselhos dados e apoio no desenvolvimento dos arranjos.

## RESUMO

DIB, L. F. G. **Refratômetro pela técnica de óptica ondulatória**. 66f. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos). Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, São Paulo, 2015.

O presente trabalho tem por objetivo desenvolver equipamentos capazes de coletar medidas refratométricas utilizando as técnicas de óptica ondulatória de interferometria e difração e identificar qual arranjo é mais eficaz para permitir a construção de um equipamento comercial para a medida de índices de refração de líquidos. O critério será analisar a precisão e exatidão que cada arranjo possa ser capaz de fornecer. A estratégia usada é a construção de cinco arranjos, sendo três interferométricos e dois difrativos. Entre os interferométricos, dois deles trabalharam em função do deslocamento de espelhos e o terceiro trabalha utilizando vibração nos espelhos. Os dois arranjos difrativos baseiam-se no princípio da alteração do comprimento de onda da luz no espectro visível em meios líquidos e das consequências deste fenômeno na difração de luz por uma rede submersa nestes meios.

Os arranjos difrativos se mostram mais fáceis de alinhar, fornecendo resultados satisfatórios. Os arranjos interferométricos têm como grande dificuldade o deslocamento dos espelhos, seja por deslocamento mecânico ou por deslocamento eletrônico. As aquisições de dados dos arranjos interferométricos também apresentaram dificuldades por conta de fontes de ruídos externos. Para os arranjos de melhor desempenho foram usadas concentrações diferentes de líquidos para poder traçar uma curva comparativa com os valores medidos em um interferômetro de Abbe. O arranjo difrativo foi o que se mostrou mais preciso chegando a 5 casas decimais.

**Palavras-chave:** Refratometria. Interferometria. Difração.

## ABSTRACT

DIB, L. F. G. **Refractometric by technical of wave optics**. 66 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos). Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, São Paulo, ano.

This study aims to develop and study optical setups for liquids refractometry based on wave optics techniques like interferometry and diffraction. This work also aims to identify which optical arrangement is more suitable to allow the development of a commercial device for liquid refractive index measurement. The criterion will be based on the analysis of the accuracy and precision that each arrangement is able to provide. The strategy for this task is the construction of five arrangements, three of them are interferometric refractometers and the other two are based on diffraction gratings immersed in the test liquid. Among the interferometric setups two of them worked with phase-shifting mirrors, and the third one worked using vibrating mirrors. The two diffractive refractometers are based on the principle of wavelength change when light propagates through liquid media and explores this phenomenon to analyse the diffraction of light by diffraction gratings immersed in the test liquid, in order to obtain its refractive index. The diffractive arrangements are easier to align and provides satisfactory results. The interferometric arrangements present the difficulty of mirror shifting, either by mechanical displacement or electronic displacement. Data acquisition of the interferometric arrangements presented some difficulties due to external noise. For the most effective arrangements the refractive indexes of aqueous solutions with different solute concentrations were measured and the results were compared with the ones obtained through an Abbe interferometer. The diffractive arrangement was the more accurate one reaching 5 decimal places.

Keywords: Refractometric. Interferometric. Diffraction.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1:	Conjunto prisma / líquido / prisma e os raios de luz.....	16
Figura 2:	Arranjo do interferômetro de Michelson-Morley .....	19
Figura 3:	Arranjo experimental de Kachiraju.....	22
Figura 4:	Arranjo Interferômetro com feixe de referência .....	24
Figura 5:	Interferômetro com fibra óptica .....	26
Figura 6:	Sensor ultracompacto.....	27
Figura 7:	Esquema de rede de difração .....	29
Figura 8:	Refratômetro com rede de difração.....	30
Figura 9:	Arranjo com difração e interferência .....	32
Figura 10:	Arranjo com interferência e difração .....	33
Figura 11:	Configuração do arranjo interferométrico usando feixe de referência .....	35
Figura 12:	Foto do “T” .....	36
Figura 13:	Sistema responsável pelo controle e deslocamento dos espelhos.....	37
Figura 14:	Foto do arranjo Interferômetro com feixe de referência.....	39
Figura 15:	Esquema do arranjo Interferômetro simplificado com feixe de referência.....	41
Figura 16:	Foto do arranjo Interferômetro simplificado com feixe de referência.....	42
Figura 17:	Esquema eletrônico para coletar, processar e apresentar os dados.....	43
Figura 18:	Configuração pull-down .....	43
Figura 19:	Configuração do arranjo interferométrico usando vibração .....	45
Figura 20:	Alinhamento do arranjo difrativo.....	49
Figura 21:	Esquema do arranjo difrativo.....	51
Figura 22:	Foto da imagem capturada pela câmera.....	52
Figura 23:	Esquema do arranjo difrativo aperfeiçoado .....	53
Figura 24:	Parte representativa do gráfico dos dados de calibração .....	55
Figura 25:	Parte dos dados coletados com amostra de água destilada.. ..	56
Figura 26:	Número de franjas deslocadas na referencia e no líquido.....	58
Figura 27:	Calibração do Canal A .....	60
Figura 28:	Calibração do Canal B .....	60
Figura 29:	Resposta do Canal A em relação ao Canal B.....	61
Figura 30:	Relação entre amplitude de vibração e concentração de água/álcool .....	62

Figura 31:	Relação entre amplitude de vibração e índice de refração de concentrações de água com açúcar.....	62
Figura 32:	Relação entre medidas de concentração e índice de refração com refratômetro de Abbe e refratômetro difrativo.....	64
Figura 33:	Relação entre medidas de concentração e índice de refração com refratômetro de Abbe e refratômetro difrativo.....	66
Figura 34:	Relação entre medidas de concentração e índice de refração com refratômetro de Abbe e refratômetro difrativo.....	67
Figura 35:	Relação de intensidade por pixels em um segmento linear .....	68
Figura 36:	Gráfico da sensibilidade angular em função da variação de índice de Refração .....	69
Figura 37:	Esquema dos espelhos / piezoelétricos .....	72

**LISTA DE SIGLAS**

CCD	Charge-Coupled Device
DF	Divisor de feixes
EM	Espelho móvel
EF	Espelho fixo
F	Fenda
He-Ne	Hélio-Neônio
LCD	Liquid Crystal Display
LDR	Light Dependent Resistor
LOB	Lente objetiva
LOC	Lente ocular
RD	Rede de difração
VD	Vidro Difusor

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>1.1 Questão de pesquisa .....</b>	<b>15</b>
<b>1.2 Objetivo .....</b>	<b>15</b>
<b>1.2.1 Objetivo geral.....</b>	<b>15</b>
<b>1.2.2 Objetivo específico .....</b>	<b>15</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>16</b>
<b>2.1 Interferometria .....</b>	<b>18</b>
<b>2.2 Difração .....</b>	<b>27</b>
<b>3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>34</b>
<b>3.1 Interferometria com deslocamento de espelhos independentes e paralelos .....</b>	<b>34</b>
<b>3.2 Interferometria com deslocamento de apenas um espelho .....</b>	<b>40</b>
<b>3.3 Interferometria por vibração dos espelhos .....</b>	<b>44</b>
<b>3.4 Arranjo difrativo .....</b>	<b>47</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>54</b>
<b>4.1 Interferometria com deslocamento de espelhos independentes e paralelos .....</b>	<b>54</b>
<b>4.2 Interferometria com deslocamento de apenas um espelho .....</b>	<b>58</b>
<b>4.3 Interferometria por vibração dos espelhos .....</b>	<b>59</b>
<b>4.4 Arranjo difrativo .....</b>	<b>63</b>
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>65</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>69</b>
<b>ANEXO 1 Programa do Arduino para deslocar motor .....</b>	<b>77</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O índice de refração é um fenômeno que passou a chamar atenção de grandes pesquisadores nas ciências exatas a partir do século XVII. Descartes (1637) propôs que a relação entre o ângulo de incidência da luz em relação a normal e o ângulo que a luz passa a adquirir após atravessá-lo era proporcional a uma "força" posteriormente conhecida como índice de refração. Essa teoria deu origem à até hoje conhecida lei de Snell-Descartes. O índice de refração descoberto nesse período passou a ser conhecido como a razão entre a velocidade de propagação da luz no vácuo, pela velocidade de propagação da luz em um determinado meio.

Utilizando-se da lei de Snell-Descartes, Abbe (1895) concebeu um equipamento capaz de medir índices de refração de líquidos. Esse equipamento utilizaria o menor ângulo possível para que a luz seja transmitida ao passar entre dois meios de índices de refração distintos, ou seja, antes de sofrer reflexão total. Esse ângulo é conhecido como ângulo limite. Dessa forma, o inventor alemão utilizou dois prismas onde se coloca entre eles uma amostra líquida na qual se deseja analisar. De um lado do conjunto a luz é incidida, do outro é observado o desvio sofrido pela luz, e dessa forma, o ângulo de incidência da luz é alterado até encontrar o ponto em que a luz sofre reflexão total. Esse ponto é o ângulo limite, e ao conhecê-lo, é possível chegar ao índice de refração do líquido. Esse equipamento é utilizado até hoje e leva o nome de refratômetro de Abbe em homenagem ao inventor.

Para a época em que esse equipamento foi proposto a utilização dos conceitos de óptica geométrica atenderam bem aos propósitos, mas com o passar do tempo, as necessidades de maior precisão nas medições se tornou evidente e as escalas angulares se tornaram fatores limitantes para o sucesso do avanço necessário.

Inúmeros estudos de diversas áreas das ciências que recentemente vem usando o índice de refração como uma variável analisada, ilustra a obsolescência e necessidade de maior precisão. As pesquisas que mais utilizaram esse parâmetro recentemente foram nas áreas das ciências biomédicas, indústria farmacêutica, controle de processos, monitoramento de pureza do produto final das indústrias químicas entre outras.

No cenário do controle de qualidade, Machlin (2006) mostrou possível utilizar o índice de refração para caracterizar estruturas poliméricas e suas alterações estruturais. Dentro das ciências biomédicas, Riche (2007) utilizou o índice de refração para a medição de proteína plasmática total (TPP), que é um indicador clínico da saúde, estresse e bem-estar. Essa medida

pode ser obtida de maneira simples e rápida com as medidas refratométricas. Ainda na biomedicina, Zirk (2007) usou também para a detecção do teor de glicose nos fluidos corporais. Enquanto que na área dos fármacos Sun (2007) usou o índice de refração para medir a quantidade de anticorpos imobilizados e Green (2007) para monitorar a adulteração das substâncias que se deseja controlar em uma solução de medicamento.

Além dessas aplicações diretas, o índice de refração pode também ser correlacionado a outras grandezas mensuráveis. Existem trabalhos como o de Francesconi (2006) em que o índice de refração foi relacionado à densidade de líquidos que continham poliglicóis, ou Malham (2007) ao associar o índice de refração com a viscosidade conseguiu estudar as interações intermoleculares entre componentes de uma mistura, e Wattana (2003) que utiliza-o para medir o tempo de precipitação de uma determinada mistura.

Por todas essas amplas aplicações em que os dados têm uma extrema responsabilidade na exatidão e precisão, cada vez mais se faz necessário obter medidas mais confiáveis. O que se propõe para obter esses resultados é a substituição do modelo que se utiliza os conceitos de reflexão total da óptica geométrica, por princípios de óptica ondulatória. Isso se torna necessário por conta da limitação que as medidas angulares impõem ao sistema. Já na óptica ondulatória o maior limitante é o comprimento da onda da fonte emissora de luz.

Por conta dessa necessidade, a fonte emissora de luz mais adequada deve ser um laser por conta de suas propriedades particulares. Koechner (2006) define que uma fonte de luz laser proporciona algumas vantagens em relação a outras fontes luminosas, como por exemplo, o direcionamento do feixe, polarização, e características espectrais bem definidas provenientes da emissão estimulada que amplifica a luz emitida, típica desse tipo de fonte emissora de luz.

Essa abordagem já vem sendo utilizada em alguns trabalhos mais recentes onde na grande maioria se baseiam nas técnicas holográficas, interferométricas e difrativas. Tanto as técnicas de holografia quanto as de interferometria contam com um arranjo onde um feixe de luz é dividido e recombinado após percorrerem caminhos ópticos distintos. Ao se recombinarem, pela característica ondulatória da luz, eles formam um padrão de interferência. Esse padrão de interferência pode ser alterado. De acordo com a variação de um ou mais parâmetros relevantes em um dos braços de interferência, é possível defasar a onda gerando um novo posicionamento das franjas de interferência.

Barbosa (2011) utilizou uma técnica holográfica que demonstrou grande potencial na exatidão das medidas e vislumbrou a possibilidade de medir concentrações de soluções aquosas

de forma efetiva.

Já com técnicas interferométricas 3 arranjos diferentes foram testados com algumas vantagens distintas em cada uma. As mais usuais atualmente foram as de Fabry-Perot, Michelson e March-Zehnder.

Neto (2004) utilizou um arranjo interferométrico com a configuração conhecida como Fabry-Perot. Nesse arranjo foi utilizado um método onde se construiu um duplo sistema interferométrico. O propósito desse sistema é de que ambos os espelhos se desloquem simultaneamente. Um dos espelhos ao se deslocar, alteraria o padrão de interferência do conjunto, em que o feixe do laser viajou apenas pelo ar, enquanto, o outro formaria um deslocamento no padrão de interferência referente ao feixe laser viajando dentro da amostra líquida. Essas duas variações devem se comportar de formas distintas. A relação obtida entre a diferença do deslocamento das franjas de interferência dos dois interferômetros é igual ao índice de refração do líquido.

Com um arranjo interferométrico de Michelson, Kachiraju (2012) propôs uma montagem mais simples e sem a necessidade do manuseio de um sistema tão sofisticado. Foi construído um modelo onde uma célula contendo um espelho no seu interior foi preenchida com um líquido no qual se desejava medir o índice de refração. Ela foi colocada sobre uma plataforma de deslocamento linear. Essa plataforma variou eficazmente a quantidade de líquido entre a janela da cuba e o espelho fixo. A célula foi alinhada com a plataforma de translação linear de tal modo que a janela da célula e o espelho tivessem uma incidência perpendicular do feixe incidente. Dessa forma, ao se deslocar essa célula de forma controlada, associou-se esse deslocamento, com o padrão das franjas de interferência para se chegar ao índice de refração desse líquido.

Já o trabalho mais recente, Yu (2014) utilizou a técnica de Mach-Zehnder. Nesse trabalho foi desenvolvido com material de nano fibras poliméricas flexíveis (Tereftalato de Trimetileno) um sensor compacto e muito sensível capaz de obter índices de refração sem muita precisão.

Com a abordagem da difração, Makdisi (1989) propôs um arranjo onde uma rede de difração é imersa em um líquido e dessa forma há uma abertura no ângulo da difração que serve como parâmetro para medir o índice de refração do líquido que gera essa alteração.

Esse trabalho se inspira nas pesquisas que vem sendo desenvolvidas técnicas de física ondulatória para substituir os equipamentos usados hoje, em que precisão é limitada, para assim

contribuir com outros trabalhos que possam ser aperfeiçoados com as medidas mais precisas.

A ideia para chegar a esse objetivo é de integrar a simplicidade da técnica interferométrica do arranjo de Michelson à um sistema que referencie o deslocamento e outras variáveis distintas do índice de refração do líquido em estudo. É esperado que o arranjo possa ser mais simples para se alinhar, ter um número reduzido de componentes ópticos e ser menos frágil a ruídos externos.

Para contar o deslocamento das franjas de interferência geradas pelo deslocamento dos espelhos utiliza-se um transdutor do tipo LDR (*Light Dependent Resistor*). Roberts (2012) define esse tipo de transdutor como foto-resistivo, onde uma linha sinuosa de um material fotocondutor, que reduz a resistência do elemento ao ser irradiado pela luz. Para contar essa variação de sinal, esse transdutor é ligado em um arduino que segundo Roberts (2012) é uma plataforma física ou embarcada capaz de interagir com o ambiente através de hardwares e softwares. Outra forma capaz de coletar as informações pode ser a utilização de uma interface entre detector e computador. Com ela é possível digitalizar a informação podendo essa ser armazenada em forma de planilha eletrônica ou exibida em um display.

Com a possibilidade de processar as informações, torna-se ainda mais simples a interação entre equipamento e operador. Com esse contato mais amigável, é dispensável a necessidade de um técnico de laboratório com treinamento adequado e específico. O usuário poderá fazer a coleta de dados de forma simples, precisa, exata e totalmente automatizada, como nenhum equipamento proporciona até hoje.

Esse projeto integra técnicas de óptica ondulatória onde se aumenta a precisão da informação, com a automatização que torna o processo de coleta de dados simples e flexível a qualquer público. Isso encurta a distância entre a técnica sofisticada, capaz de ser operada apenas por pessoas com grande grau de conhecimento, e o usuário que tem apenas a necessidade de utilizar o parâmetro do índice de refração de alta precisão como um parâmetro complementar para seu estudo.

## 1.1 Questão de pesquisa

Tendo em vista a concepção dos instrumentos utilizados para esse tipo de medida, fica evidente que o modelo de óptica geométrica é limitado em relação às técnicas de ótica ondulatória. Por isso se pretende utilizar a óptica ondulatória através da técnica de

interferometria e difração tendo um laser como fonte emissora de luz e agregando um sistema de aquisição de dados digital para aumentar a precisão desse tipo de medida. Dentro dessa proposta é esperado que haja um ganho de precisão. Qual o ganho de precisão será possível obter e qual proposta poderá fornecer um melhor desempenho?

## **1.2 Objetivo**

### **1.2.1 Objetivo geral**

- Desenvolver equipamentos capazes de coletar medidas refratométricas utilizando as técnicas de óptica ondulatória de interferometria e difração e conseguir identificar qual é mais eficiente.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

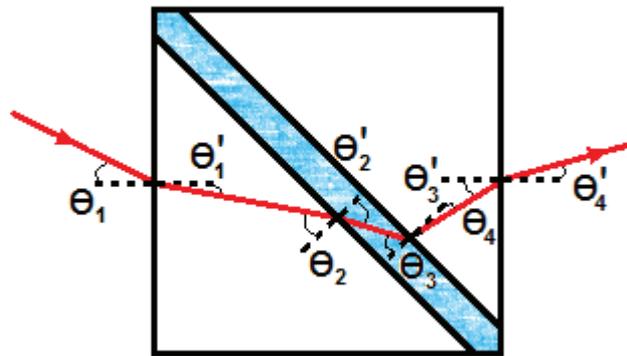
- criar um modelo físico-matemático capaz de satisfazer as expectativas;
- construir arranjos interferométricos e difrativos para coletar medidas de índice de refração de líquidos de forma mais precisa e exata;
- utilizar dispositivos eletromecânicos para coletar, processar e informar os resultados de forma exata e precisa;
- coletar medidas de índice de refração e comparar com outros dispositivos usuais e com a literatura;
- identificar qual a melhor técnica para conseguir medidas mais precisas e exatas;
- identificar pontos críticos para cada proposta;
- avaliar possíveis aplicações e melhorias futuras;

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Desde 1895, o invento do físico Ernst Abbe vem sendo utilizado como a fonte mais usual para a obtenção de medidas de índice de refração. Esse equipamento feito pelo engenheiro

alemão da empresa Carl Zeiss recebeu o nome de refratômetro de Abbe em sua homenagem. O princípio de funcionamento utilizado é obtido através da óptica geométrica. Para coletar essas medidas, dois prismas são associados de forma a receber entre eles o líquido a ser analisado. Um feixe de luz branca incide por baixo do prisma inferior que sofre um desvio previamente calculado de acordo com o material e forma dos prismas. Esse feixe após atravessá-lo sai pela parte superior desse primeiro prisma, atravessa a amostra (líquido) sofrendo um novo desvio, e por fim, entra no segundo prisma pela parte inferior dele onde sofre um novo desvio até sair pela parte superior, conforme a Figura 01.

**Figura 1** – Conjunto prisma / líquido / prisma com os raios de luz e seus respectivos desvios



Fonte: O autor

Esses prismas têm seus ângulos e índice de refração previamente conhecidos. Eles são ajustados para serem sensíveis a mudança do índice de refração da amostra entre eles. Para calcular esse índice de refração, é utilizada a teoria da reflexão total da luz que nada mais é do que uma derivação da lei de Snell-Descartes.

$$\sin \theta \cdot n_1 = \sin \theta' \cdot n_2 \quad (01)$$

Tendo o ângulo limite como sendo aquele em que não há transmissão de luz (apenas reflexão interna total), temos  $\sin \theta_2$  igual a 1, logo podemos relacionar o índice de refração da amostra diretamente ao ângulo em que a luz incide para satisfazer essa condição onde encontramos o limiar entre a reflexão total e a parcialmente transmitida.

Para a época, esse instrumento que se utilizava dos conceitos de óptica geométrica, atendeu bem aos propósitos. Com o passar do tempo as medidas de índice de refração passaram a ser empregadas em pesquisas de diversos segmentos, desde controle de qualidade de fármacos e produtos químicos quanto nas áreas biomédicas e de fármacos. Isso gerou a necessidade de uma maior precisão e com isso a necessidade de desenvolver projetos que proporcionassem essa precisão ainda maior. O antigo modelo de óptica geométrica não seria capaz de fornecer mecanismos para aumentar esse ganho de precisão pela limitação angular. Seria necessário obter essas medidas com outra linha de estudos.

Alguns anos antes de Ernst Abbe criar o seu dispositivo, James Clerk Maxwell definiu o que era a força desconhecida por Rene Descartes que era capaz de desviar a luz. Maxwell (1865) definiu o índice de refração como sendo a razão entre a velocidade de propagação da luz no vácuo ( $c$ ) em função da velocidade de propagação da luz em um outro meio ( $v$ ).

$$n = c/v \quad (02)$$

Nesse mesmo período algumas ideias já vinham mudando a forma de compreender a natureza da luz. Algumas características e fenômenos da luz começaram a não mais ser possíveis explicar através da óptica geométrica, e novas teorias precisaram ser elaboradas para explicá-la. Novas descobertas começaram a definir um modelo mais satisfatório para o comportamento da luz.

Dentro desse novo cenário, Huygens (1690) em seu livro *Treatise on Light*, considerou que a luz não era um corpo se propagando livre no espaço e sim um movimento suscetível onde se passava de um corpo para o outro, o que reforçava na época a ideia de que a luz se propagava por meio de um fluido presente no ar.

Francesco Grimaldi durante o século XVII já passou a se apoiar no conceito da luz como sendo onda e dessa forma estudou o fenômeno da difração da luz. Segundo Hecht (2008) o fenômeno da difração consiste na incidência da luz em um obstáculo opaco que gera um padrão inexplicável pela óptica geométrica. Esse padrão é dado pela defasagem na amplitude da onda, na fase da onda ou nos dois. Essa defasagem imposta por esse obstáculo gera uma nova frente de onda que combinada com a original formam esse padrão.

Em 1800 Thomas Young foi pioneiro ao conseguir explicar o fenômeno da interferência

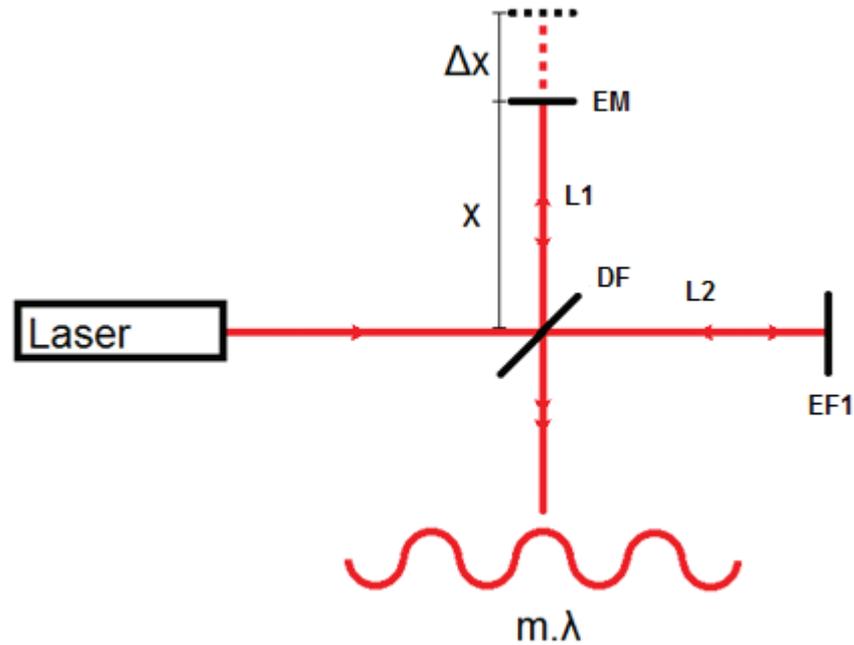
da luz com seu trabalho publicado na *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. Posteriormente, em 1864 James Clerk Maxwell descreveu pela primeira vez a luz como uma onda eletromagnética, em sua publicação *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*, que apresentou alguns dos resultados de seu trabalho referente à equação geral do campo eletromagnético. A partir desse momento, a luz passou a ser amplamente entendida e aceita como uma onda, e estudos envolvendo essa propriedade começaram a ser realizados dando início à óptica ondulatória.

## 2.1 Interferometria

A fim de confirmar a presença desse elemento fluídico, proposto por Huygens, que seria necessário para a luz se propagar, Albert A. Michelson e Edwar W. Morley com o trabalho *On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether*, desenvolveram um método capaz de medir a velocidade de propagação da luz, o que seria suficiente para detectar a presença desse elemento. Esse trabalho acabou mostrando o contrário do que se esperava. Eles detectaram que a luz não necessitava de nenhum meio para se propagar.

No arranjo proposto por Michelson e Morley (1818), pode-se notar na Figura 2 que um feixe de luz entra no sistema. Parte dele é refletido por um semi-espelho conhecido como divisor de feixes (DF), e parte é transmitido. Esses dois feixes dão origem ao que se chama de braço do interferômetro. O braço L1 proveniente da parte refletida incide em um espelho móvel (EM) e depois retorna para o divisor de feixes. Já o feixe transmitido, dá origem ao braço L2 que incide em um espelho fixo (EF) e depois retorna para o divisor de feixes. O feixe do braço L1 é transmitido pelo divisor de feixes enquanto o feixe do braço L2 é refletido, nesse momento os dois feixes se recombinam formando um padrão de interferência.

**Figura 2** – Desenho esquemático do interferômetro de Michelson-Morley.



**Fonte:** O autor

Levando em consideração que Maxwell propôs que a luz é uma onda eletromagnética, podemos dizer que essas ondas que possuem uma amplitude do campo magnético  $E$  são descritas como:

$$E_{L1} = E_{0L1} e^{i(k\Gamma_{L1} - \omega t)} \quad (03)$$

$$E_{L2} = E_{0L2} e^{i(k\Gamma_{L2} - \omega t)} \quad (04)$$

Sendo que  $K\Gamma$  é a fase da onda no espaço,  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\Gamma$  representa o caminho óptico e  $\omega t$  é responsável pela fase da onda no tempo.

Para facilitar, podemos contar intervalos inteiros de onda em função de  $\pi$  e por terem a mesma velocidade, consideramos que a interferência é dada pela soma das ondas, e assim teremos:

$$E_t = E_{0L1} + E_{0L2} = E_{0L1} e^{i(k\Gamma_{L1})} + E_{0L2} e^{i(k\Gamma_{L2})} \quad (05)$$

Tendo que a intensidade da luz é o produto do campo elétrico pelo seu complexo conjugado, temos:

$$I \propto E_T^* E_T \quad (06)$$

Logo, fazendo as devidas substituições, passamos a ter:

$$I = (E_{0L1} e^{-i(k\Gamma_{L1})} + E_{0L2} e^{-i(k\Gamma_{L2})})(E_{0L1} e^{i(k\Gamma_{L1})} + E_{0L2} e^{i(k\Gamma_{L2})}) \quad (07)$$

$$I = E_{0L1}^2 + E_{0L2}^2 + E_{0L1} E_{0L2} e^{ik(\Gamma_{L2} - \Gamma_{L1})} + E_{0L1} E_{0L2} e^{-ik(\Gamma_{L2} - \Gamma_{L1})} \quad (08)$$

Através de alguns cálculos trigonométricos, chega-se facilmente a equação 09:

$$I = E_{0L1}^2 + E_{0L2}^2 + E_{0L1} E_{0L2} 2 \cos \Delta\phi \quad (09)$$

Onde  $\Delta\phi = k(\Gamma_{L2} - \Gamma_{L1})$

Com a equação acima, podemos notar que a interferência ocorre em função da diferença de caminho óptico. Dessa forma, podemos considerar duas condições onde na primeira temos um caminho óptico dado por  $\Gamma_{L1} = 2L1 \cdot n_1$  e o segundo é dado por  $\Gamma_{L2} = 2L2 \cdot n_2$ , onde  $n_1$  e  $n_2$  são respectivamente os índices de refração dos meios por onde o braço L1 e L2 percorrem e que podem ser iguais ou não. Assim, quando eles se interferirem resultam em:

$$m\lambda = 2L1 \cdot n_1 + 2L2 \cdot n_2 \quad (10)$$

Após um dos espelhos ser deslocado, a condição que passamos a ter é:

$$m\lambda = 2(L1 \cdot n_1 + \Delta x) + 2L2 \cdot n_2 \quad (11)$$

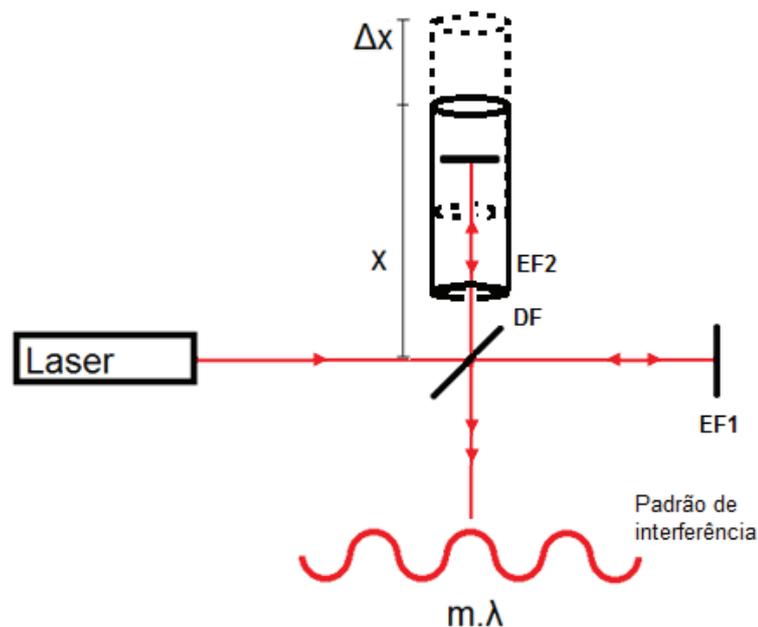
Assim, ao subtrair as equações, caso tenhamos índices de refração iguais em ambos os braços de interferência, passamos a ter:

$$m\lambda = 2\Delta x \quad (12)$$

Esses trabalhos têm reflexos até os tempos de hoje. Eles são utilizados como uma ferramenta poderosa. E suas deflexões podem ser vistas em trabalhos como o de Kachiraju (2012) que utilizou a proposta de Michelson para propor um arranjo interferométrico com a finalidade de medir o índice de refração de líquidos com uma precisão muito maior do que a proposta pelo refratômetro de Abbe, esse trabalho conta com seis casas de precisão.

Nesse método o arranjo é idêntico ao que Michelson utilizou para comprovar a inexistência do éter, porém, nesse caso, todos os espelhos foram fixados para não sofrer deslocamento como pode ser visto na Figura 3. Outra importante alteração nesse caso é a utilização de um laser de He-Ne com um comprimento de onda nominal de 632,8 nm e potência de 2,5 mW como fonte luminosa. O que se faz para obter as medidas de índice de refração com tamanha precisão, é o espelho *EF2* ficar imerso em uma célula contendo o líquido a ser analisado. Essa célula sofre um deslocamento  $\Delta x$  conhecido, conforme aumenta o volume no braço com comprimento  $x$ , a propagação da luz sofrerá um retardamento devido a alteração do caminho óptico, e com isso, o padrão de interferência formado no braço *Y'* é deslocado.

**Figura 3** – Arranjo experimental para determinação do índice de refração com dois espelhos fixos (*EF1* e *EF2*) e utilizando uma cuba móvel contendo um líquido.



Fonte: O autor

No trabalho de Kachiraju, esse deslocamento de franjas é captado por uma câmera ligada a um computador que registra a variação de intensidade luminosa e converte essa leitura para um sinal digital. Um software dedicado para essa finalidade (LabVIEW®) desenha a curva da

intensidade em tempo real.

Esse trabalho analisa o índice de refração da água, de combustível de foguete, glicerina, álcool e óleo de cozinha. Os resultados obtidos são bem exatos e precisos. Além dessa análise, é feito também uma análise do índice de refração em relação à concentração de sacarose no líquido. Essa análise também é bem sucedida e mostra ser capaz de obter medidas com precisão de  $0,1 \times 10^{-5}$ .

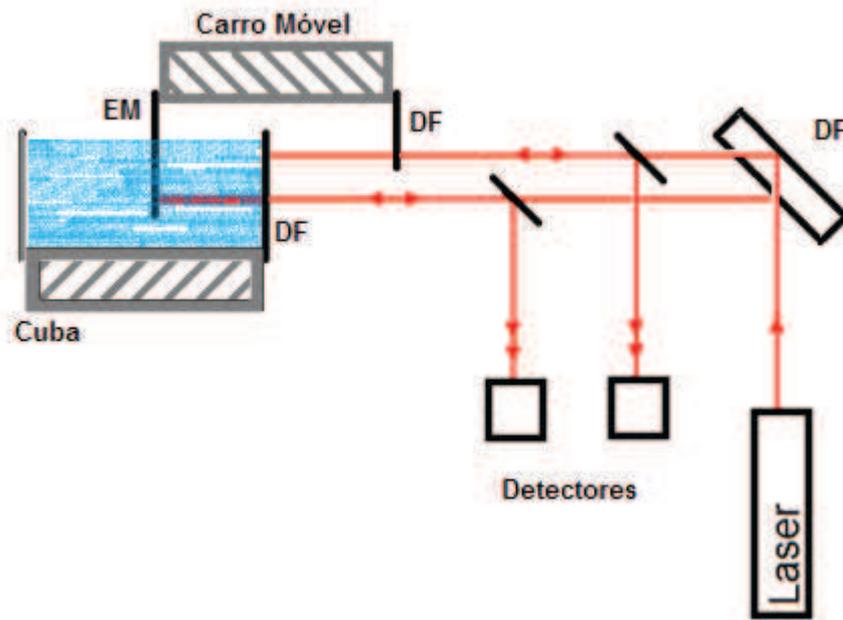
É possível comprovar nesse arranjo que a relação entre a simplicidade dos componentes ópticos e a qualidade dos resultados obtidos o torna vantajoso. Ele também aponta que a utilização da óptica ondulatória permite aumentar a precisão das medidas refratométricas. Em contrapartida, a necessidade de uma condição bem controlada do sistema de variação volumétrica da célula onde o líquido é armazenado, o controle das condições do ambiente em que o trabalho é realizado e a utilização de um computador para coletar as informações, exigem uma confiabilidade grande nesses dados para não comprometer a exatidão do processo.

Dentro da mesma linha, porém com outra abordagem interferométrica, Santiago Neto (2004) utilizou-se da técnica interferométrica desenvolvida por dois físicos franceses (Charles Fabry e Alfred Perot) e que por conta disso leva o nome deles (interferômetro de Fabry-Perot). Nesse trabalho é proposto um arranjo que consiste em um laser, também de He-Ne com o comprimento de onda de 632,8 nm que emite um feixe de luz sobre um duplicador de feixes como pode ser visto na Figura 4. Esse duplicador de feixes gera dois feixes com as mesmas características. Depois disso ambos os feixes passam por um divisor de feixes posicionado a  $45^\circ$  onde nesse primeiro momento se deseja utilizar apenas o feixe transmitido. Esses dois feixes incidem em um par de semi-espelhos, sendo que os dois feixes têm um semi-espelho em comum e atrás, um espelho distinto para cada um. A luz de cada feixe sofrerá múltiplas reflexões entre os espelhos e semi-espelhos. Dessas múltiplas reflexões, feixes que percorreram caminhos distintos devido à quantidade de vezes que refletiu nesse espaço, se interferem, e ao retornarem para o divisor de feixes a  $45^\circ$  eles são direcionados para projetarem o padrão de interferência de cada um em detectores diferentes.

Um dos semi-espelhos móveis fica imerso em um recipiente onde o líquido que se deseja estudar é depositado. O outro semi-espelho móvel encontra-se apenas no ar. Os dois deverão se deslocar simultaneamente e isso proporcionará ao arranjo a capacidade de medir o deslocamento de franjas para as duas situações distintas, onde uma mede as condições envolvendo o líquido, e a outra mede referência das condições do ambiente em que se encontra o arranjo e o deslocamento. Assim, é possível ter um sistema capaz de compensar variáveis

independentes ao índice de refração.

**Figura 4** – Arranjo Interferométrico com feixe de referência gerado pelo duplicador de feixes (DF) que direciona os feixes aos divisores de feixes (DF) responsáveis pelo interferômetro até incidirem nos espelhos móveis (EM)



**Fonte:** O autor

Nesse trabalho, um foto-transistor é utilizado como detector para registrar a variação da intensidade luminosa. Ele é vantajoso por não necessitar de calibração. Esse foto-transistor é ligado a um circuito amplificador para aumentar o sinal das medidas coletadas.

Medidas do índice de refração e a relação dele com a concentração de NaCl em uma solução aquosa são feitas para confirmar o funcionamento do sistema. Apesar de este trabalho também se mostrar mais eficiente do que as medidas obtidas pelos refratômetros de Abbe, ele não se mostra mais preciso do que o trabalho citado anteriormente onde o arranjo de Michelson é utilizado. Esse trabalho obteve cinco casas decimais de precisão. No entanto, a utilização do feixe de referência torna esse equipamento mais independente do controle de deslocamento dos espelhos, e até mesmo as variações externas do ambiente, o que permite que ele seja utilizado em lugares com ambientes menos controlados.

Uma terceira técnica interferométrica é aplicada para o arranjo de Suhadolnik (2007)

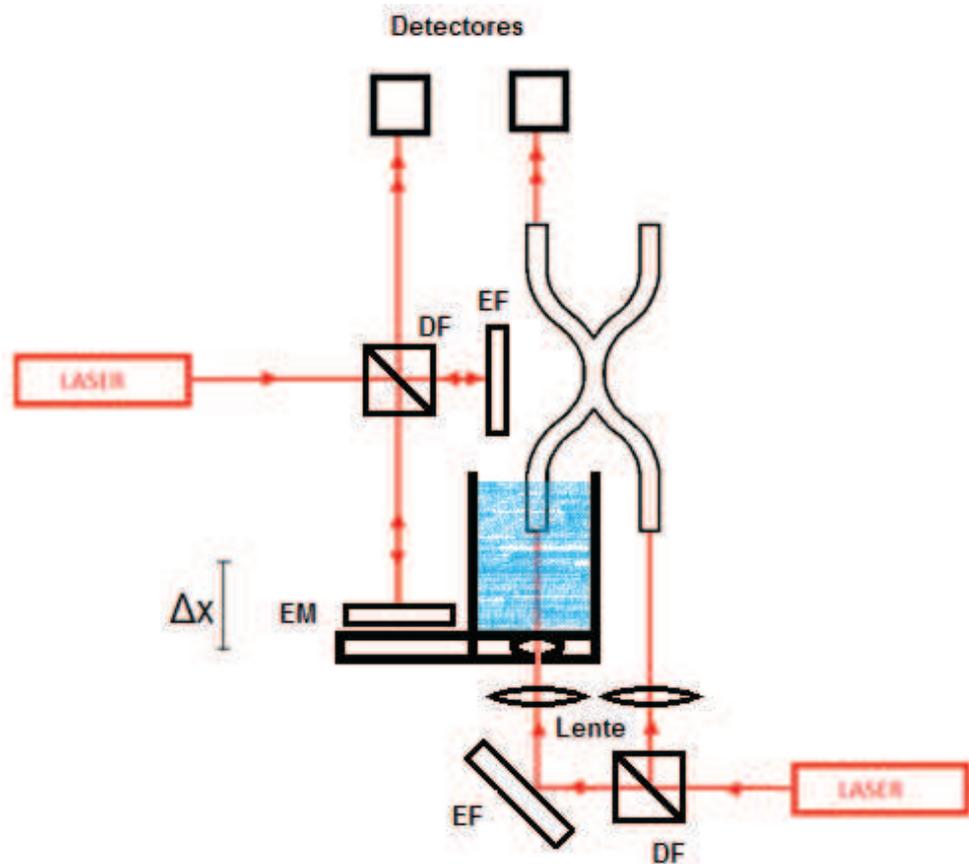
que utiliza a técnica de Mach Zehnder e de Michelson simultaneamente. O interferômetro de Mach Zehnder é semelhante ao interferômetro de Michelson, porém utiliza-se de um feixe luminoso expandido. Ainda houve a tentativa de compactar a montagem em relação as outras. Para compactar esse arranjo, é utilizado um sistema que usa a fusão de duas fibras ópticas para construir o sistema interferométrico, onde a região em comum das duas fibras fundidas se comporta como um divisor de feixes, produto de uma espécie de interface entre elas. Nesse arranjo, assim como os outros, é utilizado como fonte emissora de luz um laser de He-Ne com comprimento de onda de 632,8 nm. A parte do arranjo que envolve o interferômetro de Michelson é o responsável pela medida do deslocamento do sistema, assim como o feito por Santiago Neto. A outra que tem o arranjo interferométrico de Mach-Zehnder utiliza o sistema de fibra óptica para a sua construção e é onde um de seu braço de interferência é imerso na água de acordo com o que pode ser visto na Figura 5. Assim como o trabalho de Kachiraju, esse também utiliza a ideia de alterar o volume de água em um dos braços interferométricos.

Na saída dos dois arranjos interferométricos, é colocado um fotodiodo para fazer a leitura da variação da interferência, e ambos os sensores são ligados em contadores onde as leituras são devidamente processadas.

Esse trabalho aponta a otimização proveniente da utilização de um sistema de controle preciso para variável do deslocamento, que pode realimentar o sistema com informação precisa para que seja calculada a variável desejada que no caso é o índice de refração. Assim, da mesma forma que o arranjo anterior, podem ser filtradas alterações do ambiente, geradas por falta de controle nas condições externas.

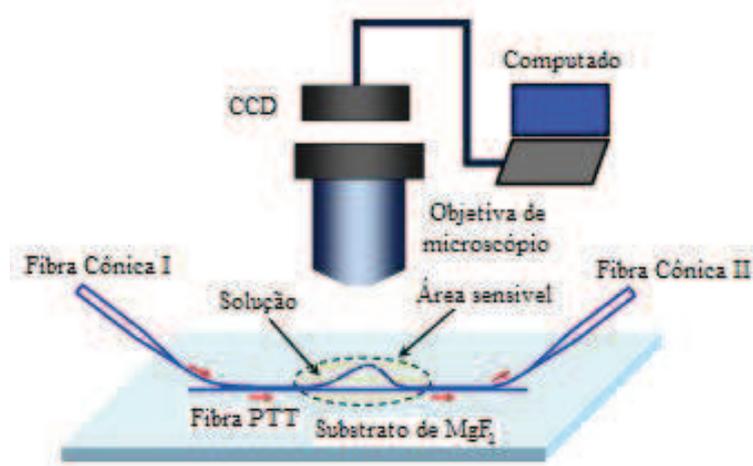
Para esse sistema foram feitas medidas com amostras de acetona, benzeno,  $CCL_4$ ,  $CS_2$  e água para validação da eficiência do sistema. Após elas serem devidamente processadas e analisadas, o autor pode chegar a resultados com cinco casas decimais de precisão.

**Figura 5** – Arranjo interferométrico composto de interferômetro de Michelson e Mach-Zehnder com fibra óptica contendo divisores de feixes (DF), espelhos fixos (EF) e espelho móvel (EM).



Fonte: O autor

Yu (2014) tentou compactar mais o sistema interferométrico fazendo um ultracompacto e sensível sensor para medidas de índice de refração em detrimento da precisão como pode se observar na Figura 6. A técnica utilizada foi a interferométrica de Mach-Zehnder. Além dessa técnica interferométrica, é utilizado um recurso de nanotecnologia em trabalho com nano-fibras com tamanhos entre 200 a 800 nm. O que se mede para chegar ao índice de refração são vales de comprimento de onda na estrutura MZI causados pela alteração nas condições do ambiente, ou seja, pela diferença do índice de refração.

**Figura 6**– Sensor ultracompacto

**Fonte:** Yu (2014)

Esse trabalho também tem o diferencial de fazer medidas de concentrações molares de soluções. A concentração molar é obtida de forma ainda mais imprecisa levando em consideração que obtém apenas duas casas decimais. Além do tamanho do sensor, ele também tem um baixo custo de produção. Há uma perda de precisão, porém, é possível observar que as técnicas interferométricas podem contribuir com fatores como precisão, exatidão, e até mesmo sistemas ultracompactos.

## 2.2 Difração

Outro fenômeno da óptica ondulatória que há algum tempo é estudada para medir índice de refração é o fenômeno da difração. O elemento fundamental para gerar esse fenômeno utilizado na busca de medidas difrativas é a rede de difração, que Hecht (2008) define como uma matriz de repetitivos elementos de difração. Essas matrizes podem ser formadas por aberturas ou obstáculos tais como filamentos, que sejam capazes de causar alterações nas características de fase, amplitude, ou ambas de uma onda. Essa defasagem gera um padrão de interferência entre as ondas originais e as geradas após a colisão com o elemento difrativo.

Se considerarmos frentes de onda próximas o bastante que permita tratá-las como um ponto único, podemos comparar esse fenômeno com o fenômeno da interferência. Dessa forma temos:

$$E_t = E_{0L1}e^{i(k\Gamma_{L1})} + E_{0L2}e^{i(k\Gamma_{L2})} + E_{0L3}e^{i(k\Gamma_{L3})} + \dots + E_{0Ln}e^{i(k\Gamma_{Ln})} \quad (13)$$

Como o espaço permanece o mesmo a fase varia num espectro contínuo, podemos dizer que

$$E = \int_{-d/2}^{d/2} E_0 \cdot e^{i(k\Gamma_{Ln})} dy \quad (14)$$

Considerando que o caminho óptico percorrido pela onda seja dado por

$$\Gamma_{Ln} = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta \quad (15)$$

Sendo que uma onda  $m$  tem o intervalo de  $2\pi$ ,  $d$  a espessura do elemento difrativo e  $\theta$  o ângulo de defasagem da onda, então se substituir a equação (14) na (15) temos:

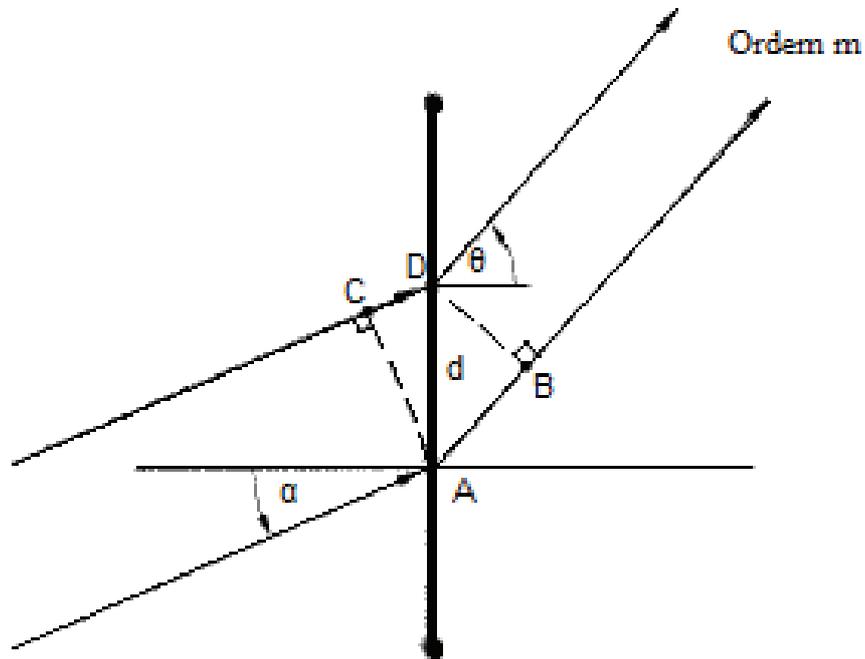
$$E = \int_{-d/2}^{d/2} E_0 \cdot e^{i\left(\frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta\right)} dy \quad (16)$$

Da equação 16, podemos chegar à condição de máximos de difração:

$$m\lambda = d \sin \theta_m \quad (17)$$

Onde  $m$  é a ordem de difração referente aos números inteiros de ondas defasadas. O que as variáveis dessa equação representam pode ser visto na figura 7.

**Figura 7**– Esquema de rede de difração com espaço  $d$  entre as linhas, ângulo  $\alpha$  de incidência e um ângulo  $\theta$  de difração para uma ordem  $m$  genérica



Fonte: Hecht (2008)

Tudo que está descrito até o momento é aplicável apenas para casos onde a incidência da luz é perpendicular ao elemento difrativo. Porém, se incidirmos a luz na rede com um ângulo  $\alpha$  de acordo com a Figura 7, o ângulo difratado passa a assumir uma nova forma. Para esse caso, a equação que melhor representa essa situação é:

$$d(\sin \theta - \sin \alpha) = m\lambda \quad (18)$$

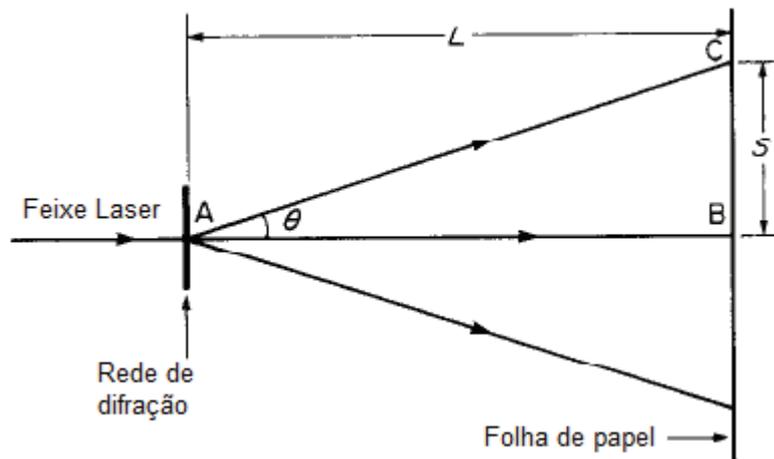
Quando a luz atravessa um determinado meio com índice de refração maior que 1, a luz tem sua velocidade de propagação reduzida, dessa forma comprimento da onda é alterado em relação à onda original e, por sua vez, gera um deslocamento angular na luz difratada obedecendo a seguinte relação:

$$d(\sin \theta - \sin \alpha) = m\lambda_0/n \quad (19)$$

Utilizando esses conceitos, Makdisi (1989) propôs um arranjo difrativo onde utiliza como fonte de luz um laser de He-Ne com comprimento de onda de 632,8 nm e uma rede de difração de transmissão com 600 linhas/mm são utilizados para medir o deslocamento linear entre a ordem difratada no líquido em relação à mesma ordem sem a presença do líquido, ou seja, difratada apenas no ar.

A montagem proposta consiste em mergulhar uma rede de difração em um recipiente de vidro de 21,18 x 6,00 cm com água. O laser é incidido perpendicularmente à rede de difração e na parte posterior desse recipiente é colocada a câmera que vai registrar o deslocamento angular da difração devido a alteração do índice de refração, de acordo com o que é representado pela Figura 8.

**Figura 8** – Refratômetro com rede de difração.



**Fonte:** Makdisi (1989)

Nesse trabalho o autor utiliza a Eq. 17 para fazer os cálculos, levando em consideração que incidência da luz na rede de difração é perpendicular, a equação pode ser simplificada para:

$$d \sin \theta = m\lambda/n \quad (20)$$

Onde a ordem m é composta por números inteiros.

Os líquidos utilizados para testar a proposta são a acetona, anilina, benzeno, tetracloreto

de carbono, clorofórmio, éter, álcool etílico, e álcool metílico, tolueno e água. Para essas medidas são encontrados erros menores de 0,03% e precisão de quatro casas decimais.

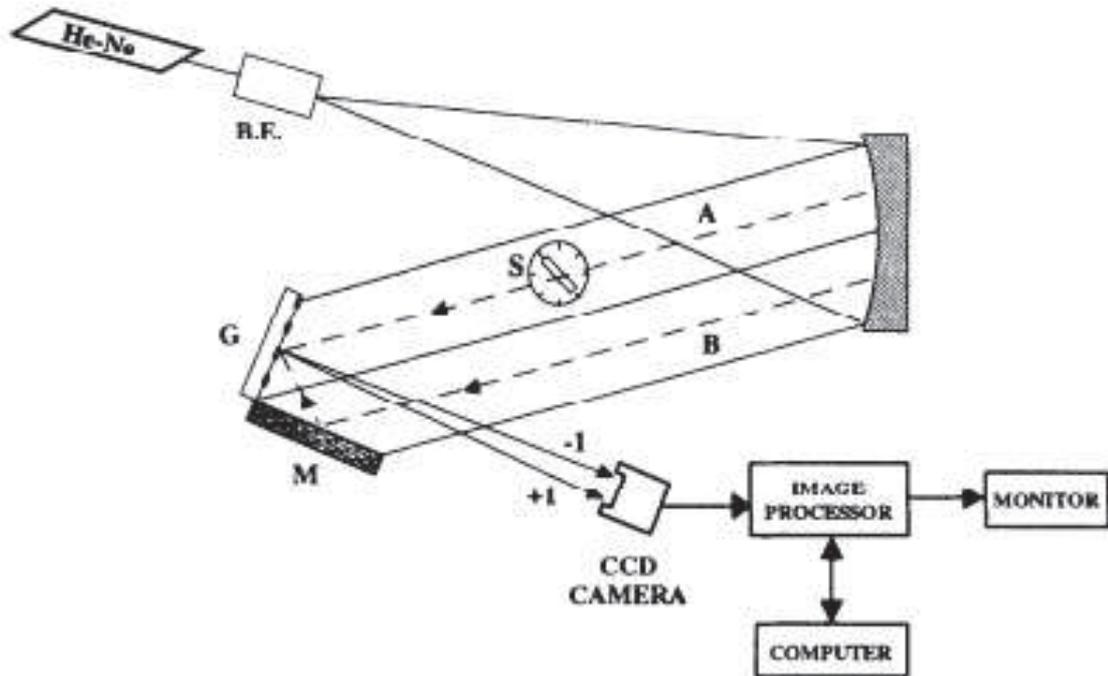
Esse método se mostra eficaz o suficiente para uma precisão de quatro casas decimais. No entanto, tendo em vista as limitações na forma de adquirir as medidas por conta da obrigatoriedade de um grande volume de líquido para análise, ele se mostra inviável para algumas aplicações. Para amostras não muito translúcidas seria difícil obter resultados pois a luz seria dispersada no meio, havendo muita perda da intensidade luminosa e assim ao chegar no meio de registro, nada seria detectado.

Uma técnica que combina difração e interferometria foi proposta por Nicola (1995) para medir o índice de refração de sólidos translúcidos. Utiliza-se nesse trabalho como fonte de luz um feixe de laser He-Ne com comprimento de onda de 632,8 nm alargado por um expensor de feixe e colimado após ser incidido em um espelho côncavo como podemos ver na figura 9. Esse feixe colimado e expandido é direcionado a um conjunto composto por um espelho e uma rede de difração reflexiva de 1200 linhas/mm com um ângulo reto entre eles. Parte do feixe incide no espelho e por sua vez é refletido para a rede de difração, enquanto a outra parte do feixe atravessa o material em análise, que nesse caso são utilizados um vidro BK7 de 6 mm de espessura e um quartzo de 2mm sofrendo uma alteração de fase e então incidindo direto na rede de difração. A combinação entre esses dois feixes na rede de difração geram uma interferência e tem as suas ordens +1 e -1 respectivamente, projetadas em uma câmera CCD com o tamanho dos pixels de 11 X 13  $\mu\text{m}^2$  que tem um ângulo de  $90^\circ$  em relação ao espelho. Dessa forma, a câmera registra a interferência para se chegar ao índice de refração do meio de acordo com o que é representado pela Figura 9.

A imagem capturada pela câmera é enviada para um computador onde é processada e exibida em um monitor para que os dados sejam analisados.

Com esse sistema foi encontrado o índice de refração do vidro BK7 igual a 1,5150 e para o quartzo é 1,4570. Embora tenhamos intenção de medir índices de refração de líquidos, pode ser possível substituir um objeto sólido por um recipiente contendo uma amostra líquida.

**Figura 9** – Arranjo com difração e interferência.



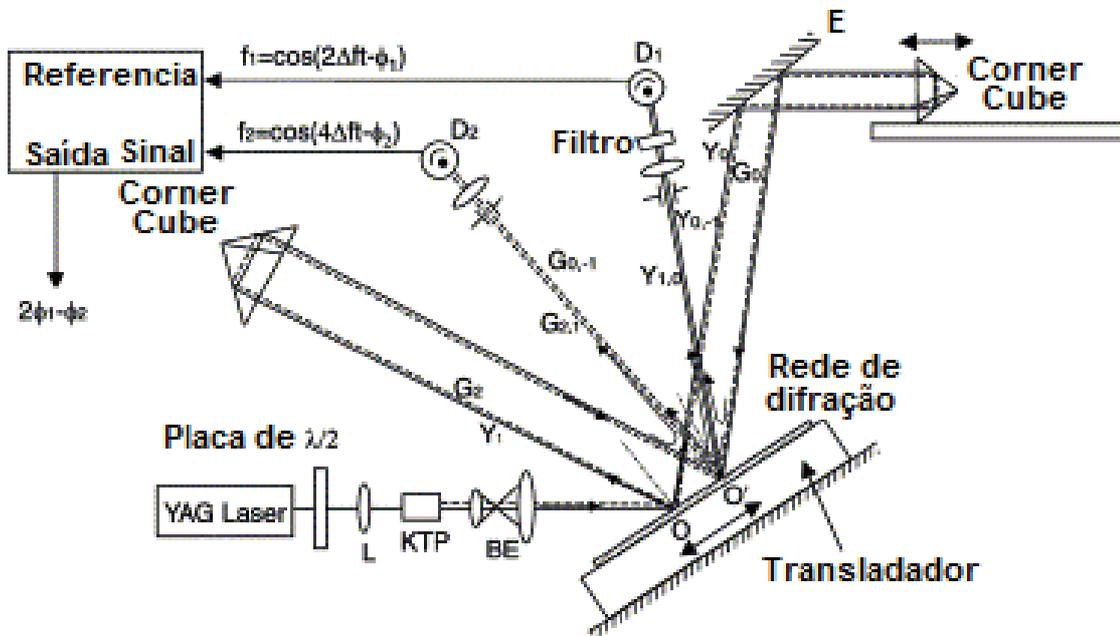
**Fonte:** Nicola (1995)

Zeng (2002) apresentou outra proposta onde também combinou os fenômenos da difração e da interferência. Nele são utilizados dois comprimentos de onda gerados por um laser YAG bombeado por um diodo que são 1064 nm e 532 nm de acordo com o exposto na figura 10. O segundo harmônico do laser é possível ser obtido graças à utilização de um cristal KTP. A utilização da rede de difração de 1200 linhas/mm serve para decompor o feixe laser e assim poder separar os dois comprimentos de onda. Após ter decomposto os dois comprimentos de onda, eles incidem em um conjunto de espelhos que é deslocado. Esses feixes ao retornarem para a rede de difração sofrem interferência e novamente são separados. Na saída de cada feixe com comprimento de onda distinto é colocado um detector com o intuito de contar o padrão de interferência e comparar os dois para poder medir o índice de refração do meio onde o arranjo é montado, de acordo com a figura 10.

Esse trabalho basicamente reproduz o que outros dois trabalhos envolvendo a interferometria propuseram; entretanto, o fator de controle é o padrão de interferência gerado por dois comprimentos de onda distintos, que conseqüentemente terão padrões distintos no deslocamento das franjas mesmo estando submetidos às mesmas condições. Esse espelho deslocado pode facilmente estar submerso em um líquido e dessa forma podem medir o índice

de refração desse líquido.

**Figura 10** – Arranjo com interferência e difração.



Fonte: Zeng(2002)

Com a revisão da literatura é possível notar que os trabalhos mostram a atualidade do assunto, a possibilidade da utilização das técnicas envolvendo a óptica ondulatória além da gama de opções que podem ser trabalhadas obtendo alto rendimento. Teorias bem fundamentadas e consolidadas são aplicadas aos modelos e nitidamente podemos ver que a tendência do desenvolvimento desse tipo de dispositivos é trazer melhorias, que podem ser em função do tamanho reduzido, da precisão dos resultados obtidos nas medidas, do baixo custo, da facilidade na obtenção dos resultados, na portabilidade ou até mesmo a obtenção de uma boa relação entre custo e benefícios.

### 3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para atingir o objetivo desse trabalho, cinco arranjos são montados e testados. Desses arranjos, três são interferométricos e os outros dois arranjos são difrativos. Os dois primeiros a serem testados são os arranjos interferométricos que utilizam o deslocamento dos espelhos. O terceiro testa um dispositivo que utiliza a vibração dos espelhos como variável. E por fim a

utilização da difração é utilizada para se obter essas medidas.

### **3.1 Interferometria com deslocamento de espelhos independentes e paralelos**

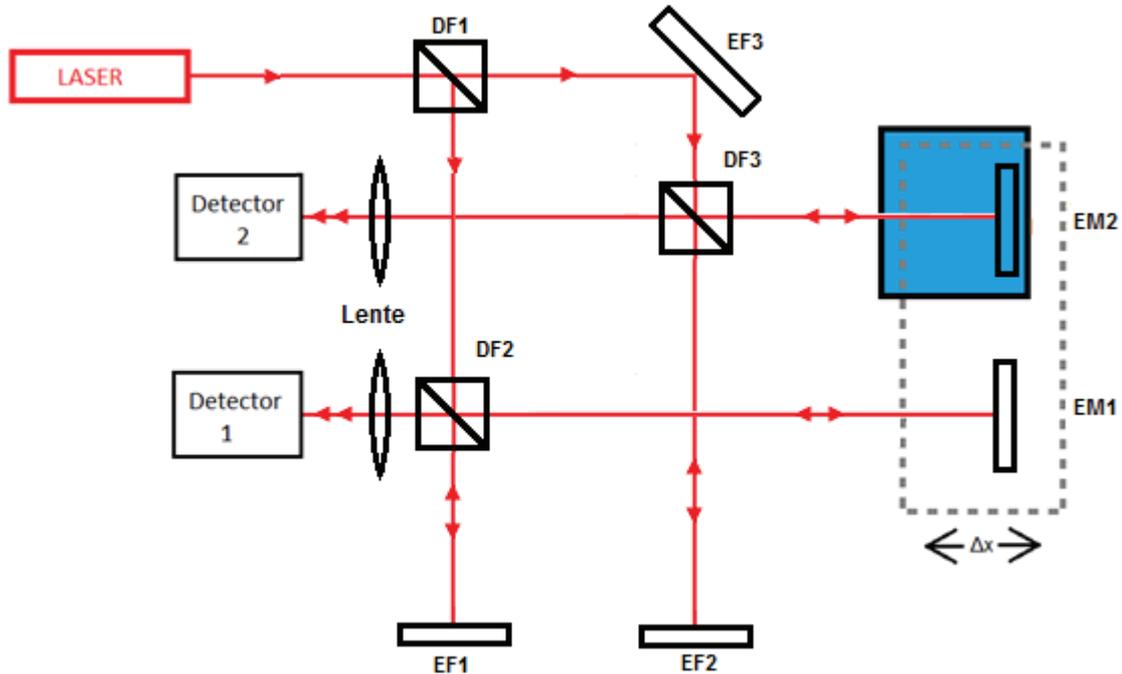
Para a primeira montagem interferométrica é utilizada como fonte de emissão de luz um laser de He-Ne com comprimento de onda de 632,8 nm e potência de 5 mW. A utilização dessa fonte emissora de luz proporciona ao sistema uma estabilidade maior para os padrões de interferência. Segundo Koechner (2006), a emissão estimulada que amplifica o sinal, proporcionando a emissão laser, tem propriedades que lhe garantem algumas vantagens em relação a outras fontes luminosas. Algumas dessas vantagens podem ser, por exemplo, o direcionamento do feixe, a polarização da luz, a coerência óptica e características espectrais bem definidas. Essas características particulares dos lasers os tornam a fonte mais indicada para um arranjo interferométrico estável. A escolha do laser de He-Ne em especial é dada pela maior coerência óptica em relação a um laser de diodo, o que proporciona para um sistema interferométrico uma facilidade maior para se obter padrões de interferência de boa qualidade óptica.

A configuração do arranjo pode ser vista na Figura 11, onde a partir da fonte laser de emissão de luz, o feixe é incidido em um divisor de feixes (DF1) fixado em um suporte ajustável sobre um carrinho que desliza sobre um trilho. Dessa forma, é possível posicioná-lo em frente ao laser e ajustá-lo para que ele tenha um ângulo de incidência de  $45^\circ$  onde dois feixes idênticos são gerados. Tanto o laser como o divisor de feixes (DF1) são ajustados para que a parte refletida pelo divisor de feixes (DF1) seja direcionada a um segundo divisor de feixes (DF2). Este segundo divisor de feixes fixado da mesma forma que o primeiro, compõe um sistema interferométrico que será utilizado como uma referência no deslocamento dos espelhos (EM1 e EM2) e até mesmo para controle das condições do ambiente.

Esse segundo divisor de feixes é ajustado para direcionar a parte refletida de forma a incidir perpendicularmente no espelho móvel (EM1), que não tem ajuste de posicionamento, e a parte transmitida incidindo no espelho fixo (EF1). Este espelho, que é fixado a um suporte ajustável, é posicionado para que a incidência do feixe seja perpendicular a sua face, e dessa forma permitindo que o feixe retorne pelo mesmo caminho de ida. Após os feixes percorrerem esse caminho de ida, eles são refletidos pelos espelhos e retornam percorrendo caminho inverso. O feixe que incide no espelho móvel 1 é transmitido pelo divisor de feixes DF2) enquanto o

feixe que incide no espelho fixo é refletido. A partir desse momento eles se recombina formando um padrão de interferência. Esse feixe recombina passa por uma lente com distância focal de 80 mm e por fim é projetado no detector 1 responsável pela leitura do deslocamento das franjas de interferência.

**Figura 11** – Configuração do arranjo interferométrico usando feixe de referência.



**Fonte:** O autor.

O feixe transmitido por DF1 incide em um espelho posicionado com um ângulo de  $45^\circ$  com ajuste para que seja devidamente direcionado ao terceiro divisor de feixes (DF3). Esse terceiro divisor de feixes dá origem a um segundo arranjo interferométrico que por conta do espelho posicionado a  $45^\circ$ , torna esse arranjo paralelo ao segmento descrito antes. Para esse segmento do arranjo, o divisor DF3 é ajustado para que o feixe refletido atravessa uma cuba que contém a amostra a ser medida e chegue ao espelho EM2 com incidência perpendicular, devido ao fato de ele também não ter ajuste de posição. O espelho EM2 permanece imerso no líquido da cuba. O feixe transmitido pelo DF3 incide em outro espelho fixo (EF2) fixado em um suporte ajustável que permite o alinhamento para que a incidência seja perpendicular. Com todos os ajustes devidamente feitos e alinhados, ambos os feixes retornam pelo caminho inverso ao de ida e se recombina após atravessarem o divisor de feixes, sendo que o feixe refletido

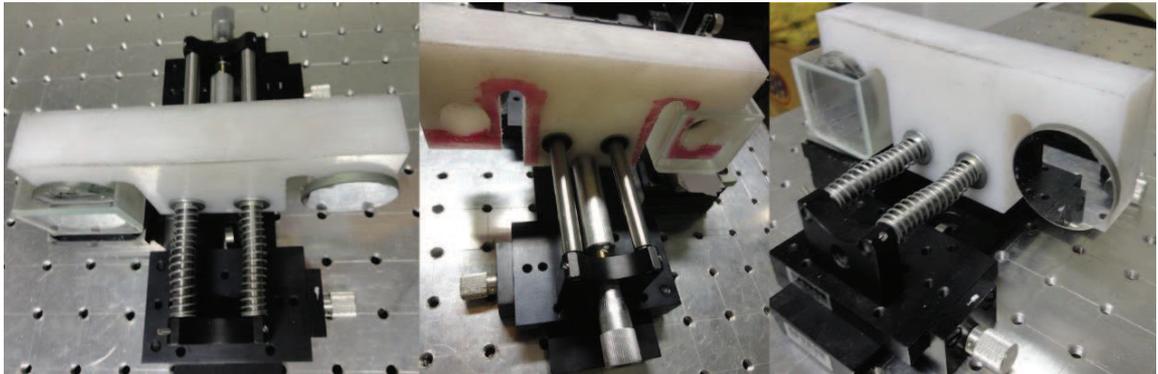
pelo espelho EM2 é transmitido e o feixe refletido pelo EF2 é refletido. Esses dois feixes recombinados, assim como no outro segmento, formam um segundo padrão de interferência, que após passar por uma lente com distancia focal de 80 mm incide no detector 2 para fazer a leitura do deslocamento das franjas de interferência.

É importante observar que devido à refletância do vidro da cuba, um padrão de interferência semelhante ao interferômetro de Fabry-Perot pode ser formado. Caso isso ocorra, os deslocamentos de franjas de interferência podem não ser gerados pelo arranjo proposto, por isso é importante ficar atento ao posicionamento da cuba.

Esse arranjo é montado em uma mesa óptica com amortecimento pneumático para absorver o máximo possível da vibração externa ao arranjo.

Para alterar os padrões de interferência, é necessário submeter os espelhos a um deslocamento. Esse deslocamento deve gerar uma alteração no padrão de interferência. Essa variação deve ser pequena o suficiente para que não supere a velocidade de leitura dos detectores. Em um primeiro momento esse deslocamento é até mais lento para que a análise seja feita a olho nu podendo certificar que o arranjo tem uma perfeita harmonia com o esperado, ou seja, que ambos os espelhos se deslocam simultaneamente.

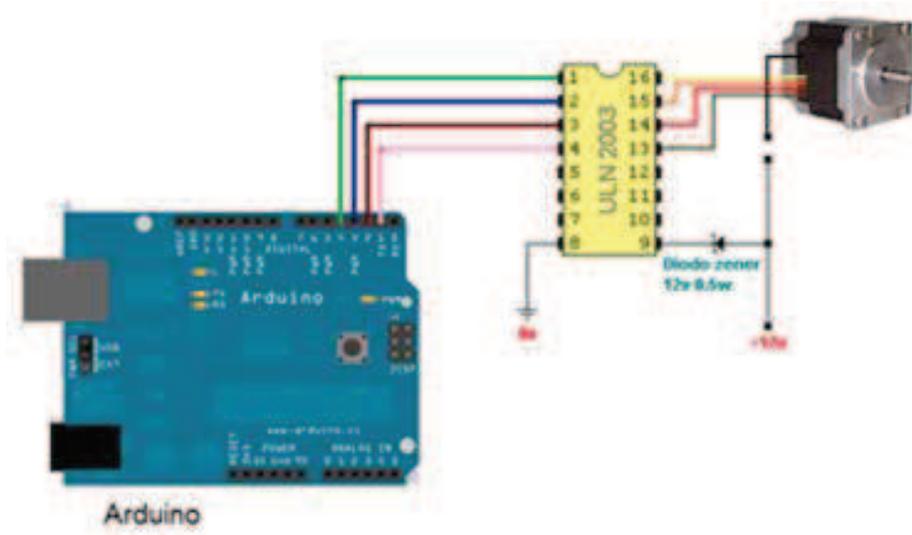
Para o deslocamento dos espelhos é usado em nylon um suporte em formato de “T” para que seja leve o suficiente para não ter um atrito grande na hora do deslocamento. Nele é fixado um espelho em cada extremidade desse “T” como o modelo exibido na Figura 12. Ele possui dois furos próximos ao centro. Em cada furo é encaixado um rolamento linear pela técnica de interferência para que esse “T” seja deslocado sem nenhuma resistência. Esses rolamentos são posicionados em duas guias com diâmetros compatíveis aos rolamentos, de forma a não ficar com folga, para não haver irregularidade no deslocamento. Na parte da frente do “T” são colocadas molas idênticas nas duas guias. Essas molas ficam ao lado oposto de uma rosca micrométrica responsável pelo deslocamento do dispositivo. Assim sendo, a rosca micrométrica e o “T” permanecem o tempo todo sem folga.

**Figura 12** – Foto do “T”

**Fonte:** O autor

Este mecanismo é acoplado a um sistema para possibilitar o deslocamento lento, contínuo e uniforme do conjunto responsável pelo deslocamento dos espelhos conforme é ilustrado na Figura 13. Esse mecanismo consiste em um motor de passo com 5 V de tensão de alimentação e de 4 fases, tendo passo de  $5,625 \times 1/64$  ou seja, a cada passo do motor há uma rotação de aproximadamente  $0,09^\circ$ . Esse motor é acoplado à rosca micrométrica através de um par de engrenagens que proporcionaram uma redução ainda maior desse passo. A alimentação do motor é provida por um *drive*. Já o controle do passo é comandado por um sistema de computação embarcada conhecida como Arduino modelo Atmega32u4. Esse sistema é pré-programado em um computador por um ambiente de desenvolvimento de programas adequado para ele. A linguagem de programação utilizada para escrevê-lo é a linguagem C e este programa é gravado no controlador desse sistema. Uma vez que esse programa tenha sido gravado, o Arduino comanda um *drive* controlador para motor de passo. Dessa forma, as informações são transmitidas dele para o *drive* que por sua vez envia para o motor de passo. A utilização do *drive* é necessária, pois o Arduino não tem capacidade para fornecer a corrente que o motor necessita. A utilização da porta dele nesse caso geralmente causa a queima da porta de saída de dados. Assim sendo, ele apenas envia pulsos para acionar o *drive* que é ligado a uma fonte de energia independente a energia fornecida pelo Arduino e que é capaz de fornecer a corrente necessária para o funcionamento.

**Figura 13** – Sistema responsável pelo controle e deslocamento dos espelhos



**Fonte:** O autor.

Para esse arranjo, se considerarmos a equação 12 e não considerando os índices de refração dos dois braços como sendo iguais, teremos para cada interferômetro:

$$\Delta m_1 \lambda = 2\Delta x_1 \cdot n_1 \quad (21)$$

$$\Delta m_2 \lambda = 2\Delta x_2 \cdot n_2 \quad (22)$$

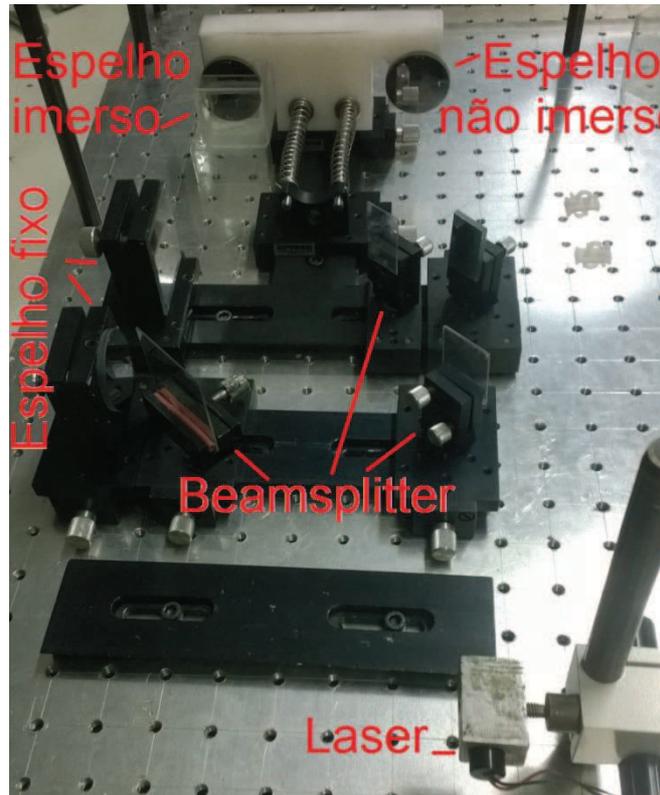
Se considerarmos que o deslocamento  $\Delta x$  e o comprimento de onda são os mesmos nos dois casos, podemos fazer uma igualdade entre as equações (21) e (22) obtendo.

$$\frac{\Delta m_1}{n_1} = \frac{\Delta m_2}{n_2} \quad (23)$$

Se considerarmos que o índice de refração do interferômetro de referência é o índice do ar que é igual a 1,00029, então podemos considerar  $n_1 = 1$  para medidas de até 3 casas decimais podendo assim simplificar a equação obtendo

$$n_2 = \frac{\Delta m_2}{\Delta m_1} \quad (24)$$

**Figura 14** – Foto do arranjo interferométrico com feixe de referência.



**Fonte:** O autor.

Quanto à parte de aquisição de dados, os dois detectores utilizados consistem em transdutores fotoelétricos da marca Optron modelo DET200K05 que são ligados a uma interface da PicoTechnology modelo ADC-11 para enviar ao computador as variações de intensidade luminosas nas quais os transdutores convertem em variação de tensão. Após o envio da informação para o computador em forma de tensão variada de acordo com a variação de luz, o *software* Picolog gera um gráfico instantaneamente a aquisição de dados dos transdutores. Esse gráfico é salvo e analisado de forma manual para contagem das franjas de interferência utilizadas para o cálculo do índice de refração do líquido.

Esse processo é feito duas vezes. A primeira vez sem a presença de qualquer líquido. Dessa forma é possível confirmar a uniformidade dos dois espelhos que são deslocados. Quando o gráfico registrado contém a mesma frequência entre a repetição de máximos e mínimos dos dois detectores, essa confirmação é obtida. Após essa confirmação, o líquido é colocado na cuba de forma a deixar o espelho imerso nesse líquido para coletar as medidas.

### 3.2 Interferometria com deslocamento de espelho único.

O segundo arranjo montado é uma proposta para aprimorar e tentar eliminar alguns erros do primeiro. Nesse arranjo também é utilizada a técnica interferométrica de Michelson onde também é iluminado por um laser de He-Ne. Para esse arranjo, menos componentes ópticos são utilizados, e por conta disso é possível montar um arranjo mais compacto.

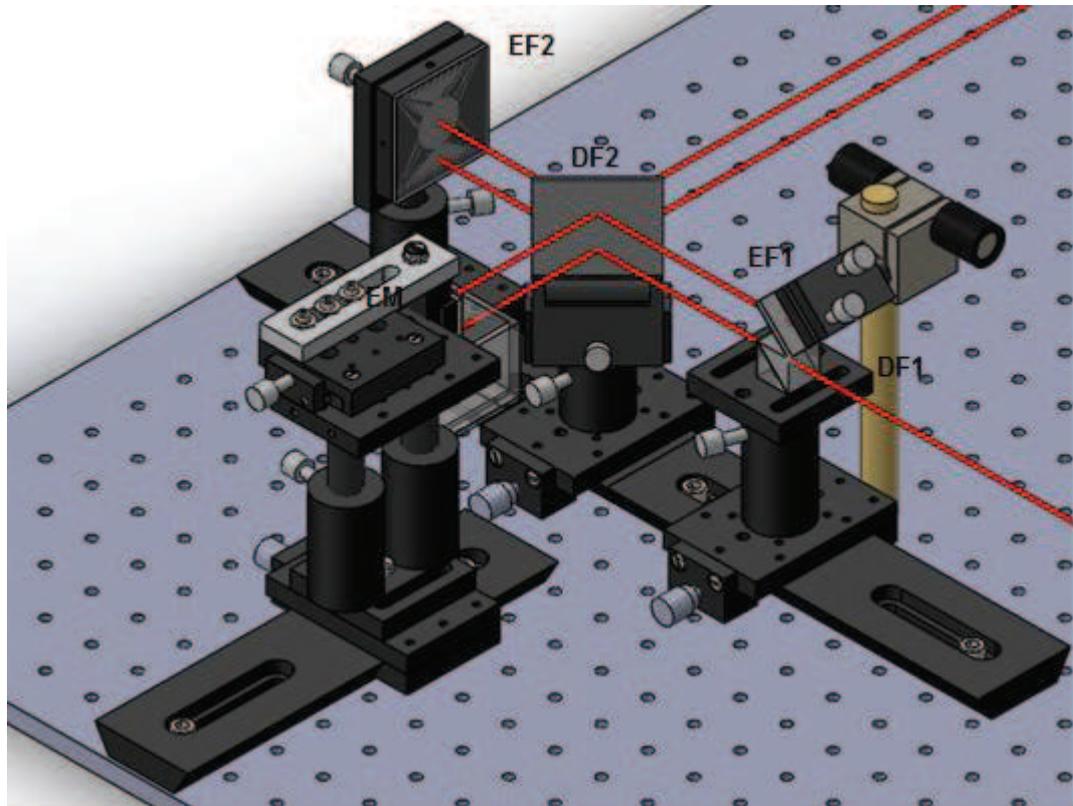
Para esse segundo arranjo, de acordo com a Figura 15, o laser de He-Ne incide em um divisor de feixes (DF1) onde um feixe sai paralelo à mesa e o outro sai perpendicularmente para cima. O feixe que sai perpendicular a mesa incide em um espelho fixo (EF1) que é posicionado a  $45^{\circ}$  a fim de direcionar esse feixe de forma paralela ao outro feixe e conseqüentemente, à mesa com apenas uma pequena diferença de altura entre eles. Dessa forma, ambos os feixes incidem em um divisor de feixes (DF2) posicionado a  $45^{\circ}$ , onde eles se duplicam. A parte transmitida desses feixes incide perpendicularmente a um espelho fixo (EF2), e a parte refletida incide também perpendicularmente a outro espelho móvel (EM1) que terá um deslocamento paralelo ao sentido do feixe. Após serem refletidos e percorrerem o mesmo caminho de ida, eles se recombinam no divisor de feixes formando um padrão de interferência para cada feixe. O espelho EM1 é parcialmente submerso em uma cuba com água de forma que apenas a parte que tem a incidência do feixe inferior é imersa.

Dessa forma, os dois padrões de interferência sofrem deslocamentos em meios com índices de refração diferentes. Assim como no primeiro arranjo, os padrões incidem em uma lente com distância focal de 80 mm e depois de ampliado o tamanho do padrão de interferência, eles são projetados cada um em um dos dois detectores que são ligados a um computador para a aquisição de dados exatamente igual ao arranjo 1.

Nesse arranjo, o posicionamento da cuba também é importante para poder extinguir a possibilidade de formar a interferência de Fabry-Perot.

Ao se deslocar o espelho, a variação nos padrões de interferência é distinta, apesar de terem a mesma fonte laser e o mesmo deslocamento. Esses fatores permitem utilizar a equação (24) que foi desenvolvida no arranjo anterior.

**Figura 15** – Esquema do arranjo interferométrico simplificado com feixe de referência.



**Fonte:** *O autor.*

Nesse arranjo também tem um incremento para diminuir a vibração. Utiliza-se nesse arranjo a mesma forma de deslocamento que o arranjo anterior, porém, as engrenagens da rosca micrométrica e do motor não têm contato direto. As engrenagens são conectadas através de uma correia dentada que por conta de seu material polimérico altamente elástico, é capaz de absorver a vibração gerada no passo do motor. Também é adicionado um potenciômetro na porta analógica do Arduino que permite controlar a velocidade do passo do motor. Quando a resistência no potenciômetro é alterada, uma tensão diferente é enviada para a porta analógica do Arduino e muda o atraso do passo do motor que conseqüentemente altera a velocidade do deslocamento dos espelhos de forma a ter uma leitura mais precisa no sistema de aquisição de dados que também recebe uma alteração.

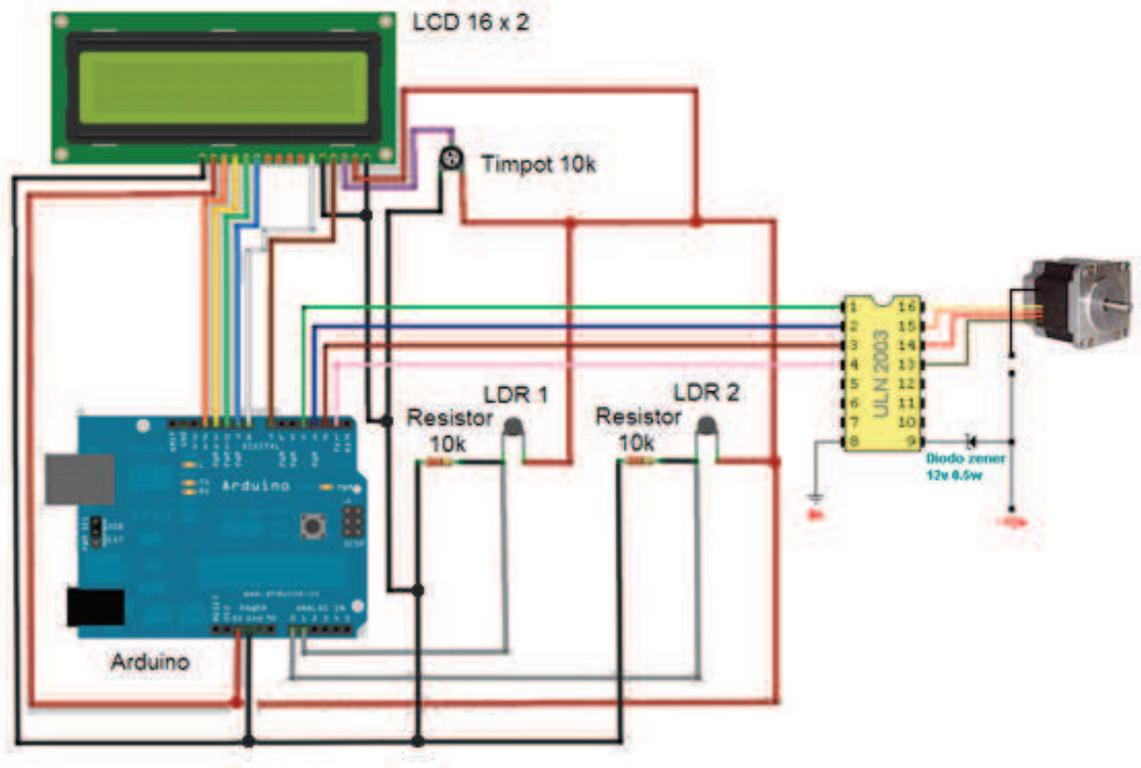
**Figura 16** – Foto do arranjo interferômetro simplificado com feixe de referência.



**Fonte:** O autor.

Para a coleta de dados, a utilização de transdutores do tipo foto-resistivos ou até mesmo fotovoltaicos, podem ser utilizados para contar o deslocamento das franjas de interferência. Esses transdutores podem ser ligados a um sistema de computação embarcada. Um exemplo é o Arduino, que processa os dados, faz as contas e exibe o resultado em um display. É possível utiliza-los simultaneamente para esse processo e o funcionamento do motor responsável pelo deslocamento da estrutura com os espelhos como a Figura 17 ilustra. Por ele possuir 13 portas digitais, é possível conectar os 4 canais necessários para o deslocamento do motor, os 2 canais para a leitura dos transdutores e as 6 portas necessárias para a conexão do display.

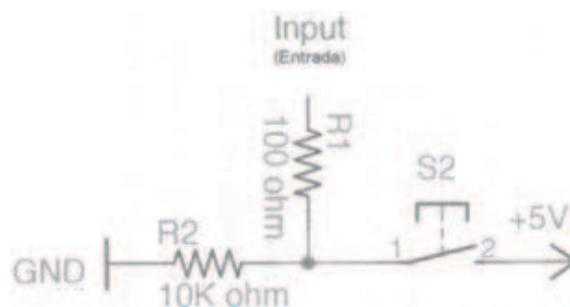
**Figura 17** – Esquema eletrônico para coletar, processar e apresentar os dados.



**Fonte:** O autor

Para a conexão dos transdutores é necessário fazer a conexão associada a um resistor na configuração conhecida como *pull-down* como mostra a Figura 18, onde temos a tensão de 5 V ligada ao transdutor e o terra ligado ao resistor que por sua vez também é ligado ao transdutor e a entrada de informação do arduino simultaneamente. Isso é necessário para que na hora que o Arduino processe as informações, não corra o risco de ruídos eletrônicos flutuantes no sistema sejam interpretados por ele como comandos.

**Figura 18** – Configuração pull-down.



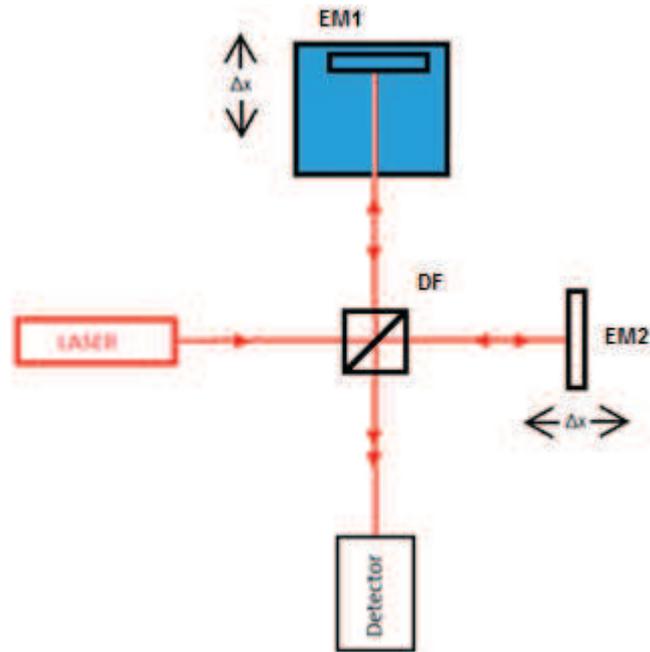
**Fonte:** Arduino Básico.

Os transdutores foto-resistivos mais populares no mercado são os chamados LDR (*Light Dependent Resistor*). Isso quer dizer que esse tipo de transdutor possui uma espécie de material semicondutor depositado em uma superfície, e quando a luz atinge esse material, sua resistência diminui, e maior é a tensão que passa por ele. Conforme houver a alteração na quantidade de luz proporcionada pela variação da interferência ou vibração, um sinal analógico será enviado para o Arduino. A leitura desse sinal será digital, onde até uma determinada intensidade de luz será considerada como máximo e que estiver abaixo dela será mínimo.

### **3.3 Interferometria por vibração dos espelhos**

Um terceiro arranjo interferométrico também montado em uma mesa óptica com sistema de absorção de vibrações externas tem a intenção de evitar a utilização de sistemas mecânicos. Para isso o princípio utilizado é de um interferômetro de Michelson. Um laser de ND: YAG dobrado em frequência com comprimento de onda de 532 nm e potência de 100 mW incide em um divisor de feixes. O divisor de feixes é posicionado para receber uma incidência de  $45^{\circ}$  de acordo com o que se pode ver na Figura 19. Tanto o feixe refletido quanto o feixe transmitido incidem em um *corner cube*, um conjunto de prismas triangulares com faces centradas em que toda luz que incide nele é refletida paralela à incidência, indiferente ao ângulo de incidência. Eles são fixados em uma estrutura polimérica por um processo chamado de acoplamento por interferência. Penalver (2014) descreve esse tipo de acoplamento como sendo o processo em que a elasticidade das duas partes fornece tensão suficiente para manter o conjunto unido devido à diferença de dimensões adequadas. Posteriormente são fixados a dois piezoelétricos distintos com uma diferença angular de  $90^{\circ}$  entre cada um deles. Os piezoelétricos têm as dimensões de 40 x 20 mm, amplitude de deslocamento de 1.1 mm, alimentação máxima de 150 V, frequência de 60 Hz e suporta até 6 g.

**Figura 19** – Configuração do arranjo interferométrico usando vibração.



**Fonte:** O autor.

Cada cerâmica é ligada a um canal do gerador de funções (Minipa modelo MFG-4221) capaz de regular a fase, a amplitude e a frequência. Os dois feixes já recombinados após reincidirem no divisor de feixe se interferem e passam por um polarizador para diminuir ruído e depois por uma lente, para ampliar o tamanho das franjas de interferência de forma a serem mais sensíveis ao detector. Esse detector utilizado é da Optron modelo DET200K05, o mesmo utilizado no primeiro arranjo proposto. Ele é conectado a um osciloscópio digital Agilent Technologies modelo DSO1052B.

A partir da equação (21) e (22) podemos definir a condição proposta por esse arranjo. Por termos uma única fonte de luz que emite um comprimento de onda  $\lambda$ , para possuir um padrão de interferência estático, definimos que a variação do deslocamento em um braço do interferômetro em função do índice de refração do mesmo, deve manter a mesma proporção para que o deslocamento de franjas seja igual a zero

$$\Delta m_1 \lambda = \Delta m_2 \lambda \quad (25)$$

Dessa forma, podemos afirmar que para uma condição onde as franjas estão estáticas

temos:

$$2\Delta x_1 \cdot n_1 = 2\Delta x_2 \cdot n_2 \quad (26)$$

Assim como nos casos anteriores, tendo que o índice de refração do braço exposto apenas ao ar é igual a 1, temos que o índice de refração da amostra é igual a razão entre a amplitude de vibração do braço 1 pela amplitude de vibração do braço 2.

$$n_2 = \frac{\Delta x_1}{\Delta x_2} \quad (27)$$

Com essa montagem devidamente alinhada, as cerâmicas são colocadas para vibrar com a mesma frequência, amplitude e fase. Assim a variação do caminho óptico de um braço interferométrico em relação ao outro é zero. Logo não há variação no padrão das franjas de interferência, e isso é constatado no osciloscópio através de um sinal constante e estável.

É necessário fazer um pequeno ajuste nos parâmetros do gerador de funções a fim de compensar fontes de ruído como diferenças nos cabos e até mesmo nas cerâmicas piezoelétricas até que o sinal no osciloscópio seja contínuo. O primeiro ajuste que deve ser feito é o da fase, pois esse parâmetro com um pequeno ajuste gera uma grande resposta na estabilidade do sistema ao se ler o sinal em um osciloscópio, além de ser fundamental que as cerâmicas vibrem em fase. Posteriormente se ajusta a frequência e a amplitude onde a resposta é mais discreta.

As diferenças das respostas dos diversos elementos eletrônicos são medidas. Inicialmente é medida a impedância de um cabo em relação ao outro. Ambos os cabos são conectados ao gerador de funções e a outra extremidade é ligada diretamente ao osciloscópio. Uma gama de tensões, variando 1,0 V por vez, indo de 0 à 12,0 V é aplicada, e a leitura no osciloscópio é conferida para saber qual seria esse valor de perda. Após ter feito isso para o primeiro cabo, o mesmo é feito para o segundo cabo. Ao conhecer os valores para cada cabo, é feita uma calibração para conferir se há alguma diferença entre os canais do gerador de funções.

Ao notar que todos os componentes isoladamente (os canais do gerador de funções, os cabos e as cerâmicas piezoelétricas) podem gerar uma alteração no padrão esperado, o arranjo e seus erros são definidos como um conjunto, ou seja, a resposta de uma cerâmica e todos os

seus elementos de alimentação em relação à outra. É possível fazer isso pois o interesse principal é em como as cerâmicas respondem no arranjo e qual a sua defasagem.

Após confirmar a harmonia entre a vibração de ambos os *corners cubes*, um deles é submerso em uma cuba com o líquido a ser analisado. Pela diferença de índice de refração, o sistema perde a estabilidade no padrão de interferência forçando a alteração na alimentação desse piezoelétrico para novamente encontrar um padrão estável. A frequência é mantida, e apenas a fase e a amplitude são alteradas. A fase é alterada para fazer uma pequena correção, enquanto a amplitude compensa a diferença causada pelo índice de refração do líquido a ser analisado.

Para se avaliar a confiabilidade do arranjo proposto, medidas de concentração de líquidos são feitas. Inicialmente uma amostra de água destilada tem o valor do índice de refração medido no refratômetro de Abbe, e depois é colocado na cuba para ser analisado nesse arranjo. Depois disso, 10% dessa amostra é retirada para confirmação do índice de refração no refratômetro de Abbe. Isso garante que a amostra não sofra alteração durante o processo de coleta de dados. No lugar desses 10% de água, é colocado álcool. Essa amostra é novamente confirmada antes e depois das medidas. E esse processo é repetido mais seis vezes. Com essas medidas é possível obter curvas da relação entre o índice de refração e concentração que por fim podem ser comparados os valores entre o refratômetro de Abbe com o refratômetro interferométrico.

### **3.4 Arranjo de Refratômetro Difractivo**

Ainda na área da óptica ondulatoria, um quarto arranjo é feito envolvendo conceitos de difração visando aumentar a precisão do arranjo anterior que é limitado à escala angular de  $0,3^\circ$ . Para esse trabalho uma rede de difração reflexiva tem as distâncias de suas linhas medidas previamente. A rede usada é definida como uma rede com espaçamento de 0,848 nm entre as linhas. Depois de confirmada essa distância, ela é devidamente fixada com a sua face refletora posicionada no centro da mesa de um goniômetro da Hilger Watts que possui precisão angular de  $2'$ . O laser deve incidir exatamente no centro da rede para que na hora que ela for girada não ocorra o deslocamento do ponto de incidência do laser na rede.

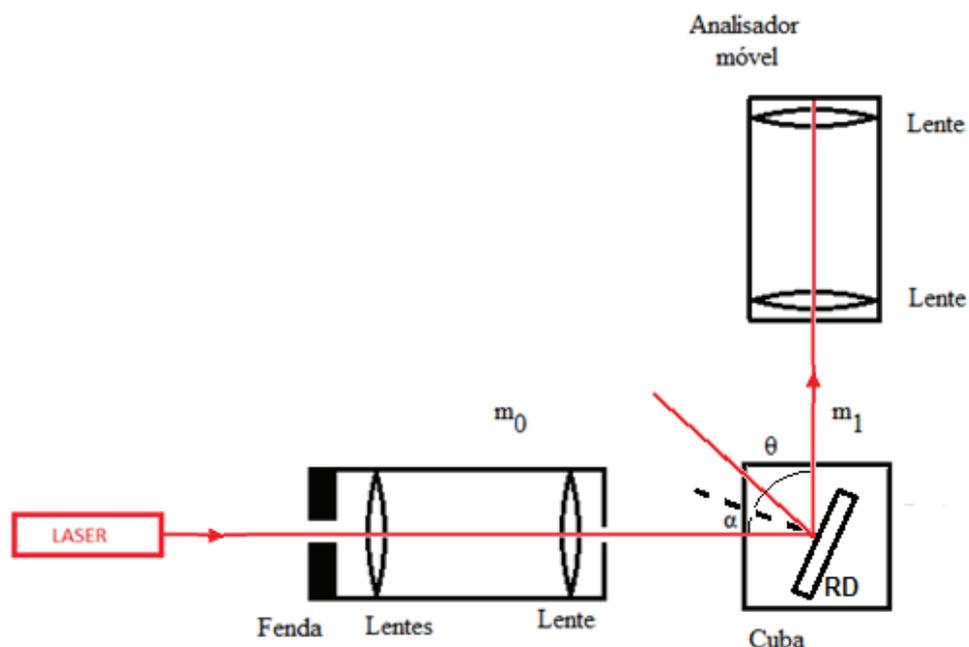
A rede de difração é parcialmente submersa em uma cuba com líquido e é iluminada por um laser de He-Ne com comprimento de onda de 632,8 nm e potência de 5 mW de forma

que a parte submersa e a parte não submersa sejam iluminadas simultaneamente. A cuba é posicionada de forma a receber uma incidência perpendicular, e a rede é girada de forma que a luz difratada em primeira ordem saia da cuba com um ângulo de  $90^\circ$ . Com a rede nessa posição, é necessário medir o ângulo em que a luz incide na rede.

Para se encontrar esses ângulos, um analisador móvel do goniômetro é utilizado. Nesse analisador temos um conjunto de lentes e um retículo para centralizar a luz. Para aumentar a precisão das medidas, na entrada do goniômetro há uma fenda ajustável para que a luz que incide na rede seja bastante fina. Outro cuidado adotado foi a colocação de um vidro despolido na frente dessa fenda, dessa forma, a fenda é iluminada homoganeamente.

Com esse posicionamento, deve-se certificar que a luz refletida tanto da parte da rede que está submersa na água quanto a parte não submersa, estejam saindo a  $90^\circ$ . Caso não estejam, a cuba deve ser girada até corrigir essa defasagem. Essa defasagem de ângulo é dada pois a luz que atravessa o líquido sofre um desvio seguindo as leis de Snell-Descartes, por tanto, é fundamental que a luz incida normalmente na cuba e também saia da cuba com um ângulo perpendicular à sua face.

**Figura 20** – Alinhamento do arranjo difrativo



**Fonte:** O autor.

Após o devido alinhamento, o processo se torna simples. A rede de difração é totalmente

imersa em uma cuba com água e lentamente girada até que a primeira ordem de difração incida no analisador ainda fixado em  $90^\circ$  em relação à incidência da luz. Após ter encontrado a primeira ordem de difração da luz que passa pelo líquido, é medido pelo próprio goniômetro qual é o ângulo de incidência da luz na rede. Isso só é possível por conta do alinhamento inicial que nos possibilita referenciar o ângulo de incidência da luz na rede. Com esses valores, é possível calcular o índice de refração do líquido. Tendo uma diferença entre o ângulo de incidência da luz na rede e a difração de ordem 1 em  $90^\circ$ , como pode ser visto na Figura 21, podemos afirmar que  $\theta$  e  $\alpha$  são complementares, portanto  $\sin\theta = \cos\alpha$ . Dessa forma, para esse caso específico, podemos fazer esta substituição na equação 19 para obter:

$$n = \frac{\lambda}{d(\cos\alpha - \sin\alpha)} \quad (28)$$

Como esse processo se mostra eficiente para medir o índice de refração da água, em uma etapa seguinte para certificar a validade do método para outras situações, são medidas concentrações de água com açúcar e comparadas com medidas em um refratômetro de Abbe. O processo adotado é de preencher a cuba com um volume de 30 ml de água destilada. Após a primeira coleta de dados, utilizando-se uma seringa, é removido 1 ml do líquido que preenche a cuba. No lugar desse 1 ml de água é colocada uma solução de água com açúcar na concentração de 1g de açúcar por cada ml. O índice de refração da solução é medido antes e depois de cada coleta de dado sem um refratômetro de Abbe para se certificar de que não há precipitação ou contaminação do líquido durante o processo de medida de forma a alterar o índice de refração. Esse processo é repetido por mais sete vezes.

Após ter obtido resultados precisos com esse arranjo, nota-se a necessidade de aumentar a precisão na escala angular para poder chegar a medidas mais precisas. Para isso uma segunda proposta nessa mesma linha é colocada em prática. Ele se vale do mesmo princípio, porém, utiliza-se de recursos mais sensíveis e de maior precisão.

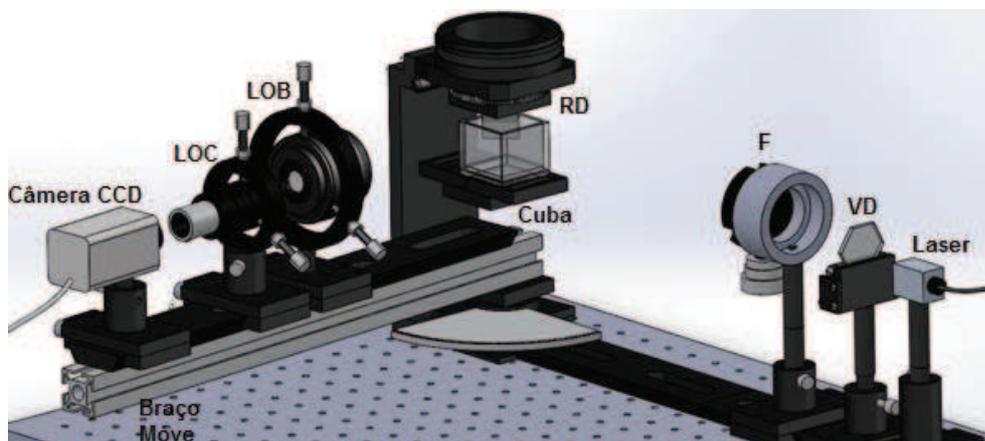
Um laser de diodo com comprimento de onda de 632 nm é incidido em uma rede de difração (RD) com um espaço entre as linhas de 835  $\mu\text{m}$  que está parcialmente submersa em uma cuba com água de acordo com o que é representado na figura 21. Essa luz sofre uma difração e a rede é posicionada de forma que a parte difratada e imersa em água saia com um ângulo de  $90^\circ$ . Após posicionar a rede de forma a satisfazer essa necessidade, procura-se a ordem 0 da luz que incide na parte da rede de difração não imersa. Para procurar a ordem 0 é

utilizado um braço de 45 cm fixado em uma base rotativa. Nesse braço é colocada uma lente objetiva (LOB) com comprimento focal de 28 mm com um pequeno ajuste de foco, à frente dela é posicionada uma lente ocular (LOC) com distância focal de 10 mm e em seguida uma câmera CCD que é ligada ao computador. Para se obter uma medida mais precisa, antes da luz incidir na rede de difração ela passa por um vidro difusor (VD) que tem a intenção de deixar a luz mais homogênea, e passa por uma fenda (F) com ajuste de abertura para torná-la o menor possível.

A rede de difração (RD) é fixada a um goniômetro com precisão angular de 2' de forma a permanecer suspensa. Essa rede é posicionada paralelamente ao sistema responsável pela iluminação. Um sistema de deslocamento é acionado para posicionar a rede de forma que a luz que sai da fenda incida no centro da rede. Após encontrar esse ponto de incidência, a rede é girada em 45°.

Esse conjunto deve estar perfeitamente alinhado para que a luz não seja desviada de forma que altere o ângulo das medidas. Esse braço tem a base rotativa posicionada de forma a ficar mais concêntrica possível à face rotativa da rede de difração. Esse braço é posicionado com um ângulo de 90° em relação ao conjunto responsável pela projeção da fenda. Dessa forma, o correto é que a luz refletida (ordem 0) pela rede de difração seja projetada na câmera CCD devido a lei que rege o comportamento da reflexão da luz. Nesse momento, sabendo das condições angulares necessárias para que o arranjo esteja devidamente alinhado, se busca através de um ajuste fino o posicionamento do braço móvel onde essas condições sejam atendidas.

**Figura 21** – Esquema do arranjo difrativo



**Fonte:** O autor.

Para que o sistema esteja completo, uma escala angular é colocada entre as lentes ocular

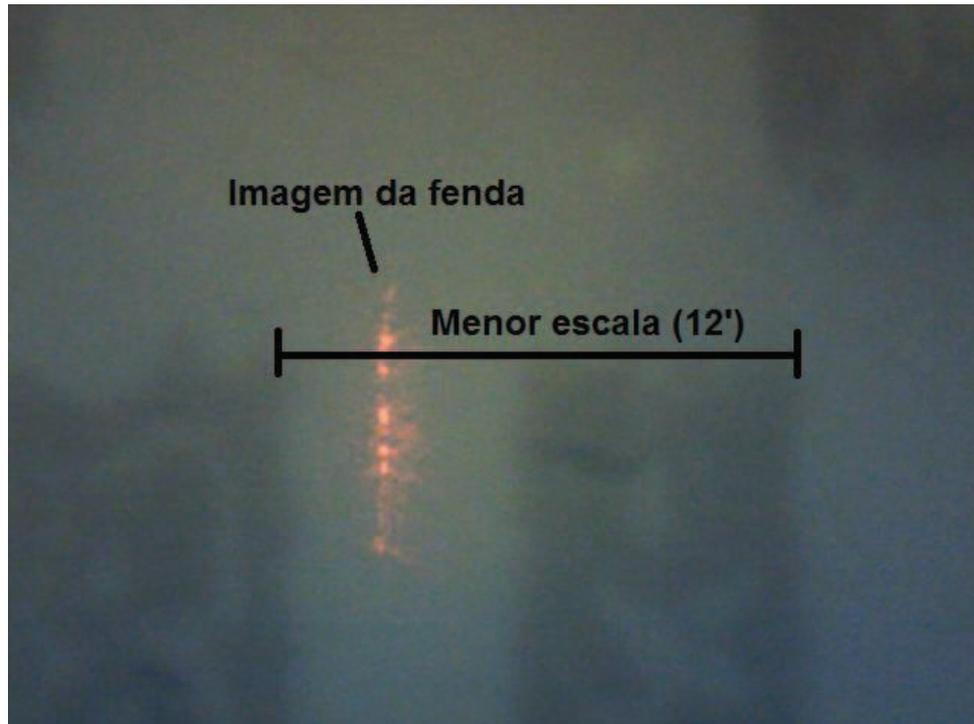
(LOC) e objetiva (LOB) de forma concêntrica a todo o sistema já alinhado. Essa escala impressa em uma transparência tem a resolução de 1 *pixel* na espessura da escala. A lente objetiva junto com a câmera CCD é posicionada de forma a focalizar a escala e obter o maior aumento possível. Já a lente objetiva é posicionada de forma a focalizar a imagem da fenda sobre a escala angular. Dessa forma, a fenda automaticamente estará focalizada na câmera CCD.

Por fim, uma cuba com um elevador e um goniômetro é posicionada abaixo da rede de difração. Essa cuba é preenchida com água e elevada de forma a submergir parcialmente a rede de difração. As faces da cuba devem receber a incidência perpendicular da luz e que conseqüentemente faz com que a luz também saia da cuba perpendicularmente. Isso é necessário para que a luz não sofra um desvio regido pela lei de Snell-Descartes. Se a luz da fenda incide perpendicular a cuba, ela atravessa a cuba sem sofrer desvio. Com a rede posicionada a 45°, após a luz ser refletida pela rede de difração, ela também deve sair da cuba perpendicularmente.

Para fazer esta constatação, a câmera capta uma imagem da parte da fenda que está imersa na água e ao mesmo tempo da parte não imersa. Dessa forma, é possível avaliar se a luz sofre desvio devido a uma inclinação da face da cuba. Se ao observar a imagem formada na câmera, a fenda submersa na água não estiver perfeitamente alinhada, o goniômetro em que a cuba está fixada é acionado para girar a cuba e corrigir essa alteração.

Após estar com as lentes posicionadas de forma a focalizar corretamente cada elemento, certificam-se as concentricidades necessárias, e os respectivos alinhamentos, uma sub escala é fixada na tela do computador para que seja possível aumentar ainda mais a precisão do arranjo. Devido à escala ter sido impressa com a maior resolução possível e o sistema óptico ampliar ainda mais essa escala, o tamanho da fenda passa a ser muito inferior ao tamanho da escala como é possível ver na figura 22, e por conta disso, essa sub escala fixada na tela do computador permite aumentar ainda mais essa precisão além de definir melhor a região central da área do CCD.

**Figura 22** – Foto da captura da imagem



**Fonte:** O autor.

Com essa montagem, o arranjo está apto para coletar medidas. Para essa etapa, o braço móvel mantém o posicionamento anterior e a rede de difração é girada até que a imagem da ordem 1 da fenda submersa em água seja formada no ângulo de  $90^\circ$ . Esse ângulo é a soma de  $2\alpha + \theta$ . Como é possível observar na figura 23.



deslocamento angular por tirar a lente objetiva do eixo óptico.

Esse sistema é submetido a uma coleta de dados de água com uma concentração crescente de açúcar. Esse processo é feito com a retirada de uma amostra de 1 ml de água da cuba que inicialmente continha 30 ml e o acréscimo de 1 ml de uma amostra com concentração de açúcar de 1g/ml. A amostra retirada é utilizada para conferir o índice de refração em um refratômetro de Abbe. No momento em que a amostra com maior concentração de açúcar é colocada na cuba, é visível um deslocamento angular da imagem da fenda. Esse deslocamento deve ser corrigido no goniômetro em que a rede é fixada. Após essa correção ser efetuada, todo o processo descrito anteriormente para a coleta de dados é novamente realizado, e assim sucessivamente é feito para cada nova concentração.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Para todos os arranjos é possível encontrar uma boa perspectiva para a continuação dos estudos, porém, é necessária uma grande demanda de tempo para poder identificar e solucionar os problemas pendentes em cada um deles. Os dados abaixo expostos foram coletados, exibidos graficamente e analisados.

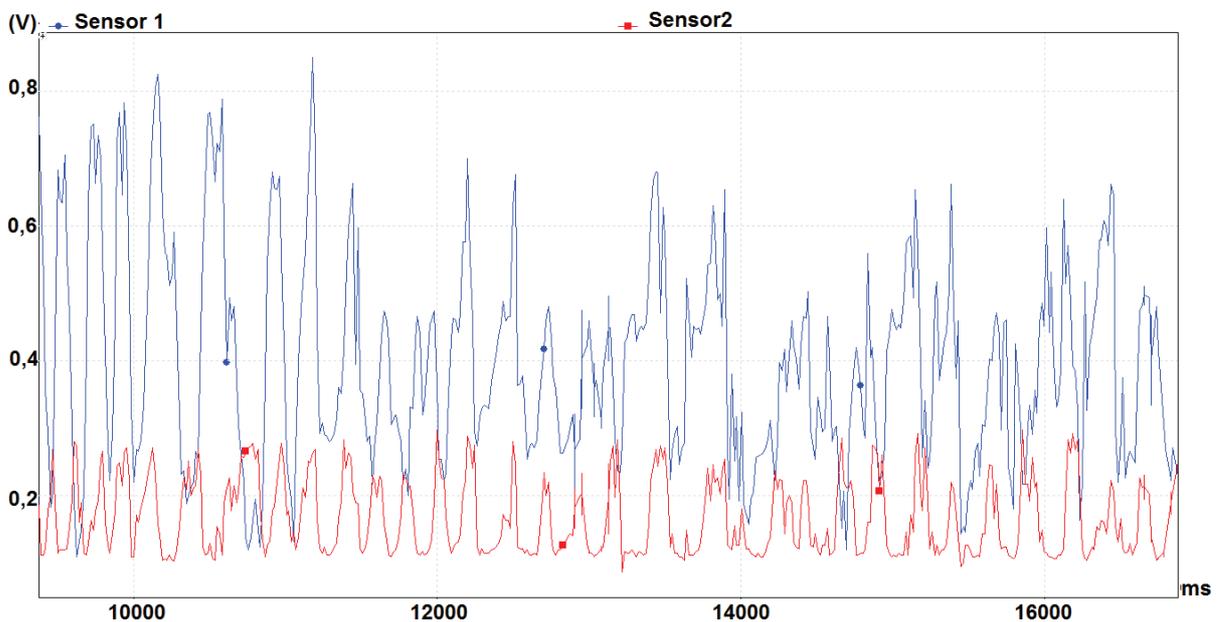
### **4.1 Interferometria com deslocamento de espelhos independentes e paralelos**

Para o primeiro arranjo, com a configuração interferométrica com referência, os dados coletados tiveram um período de coleta de 60 s. Ao longo do tempo os espelhos são deslocados, porém alguns ruídos provenientes de fatores externos e até mesmo do próprio sistema são detectados. Por conta disso, um sistema automatizado não pode ser implantado, pois dificilmente ele terá a capacidade de distinguir o ruído do sinal.

O primeiro gráfico coletado teve a intenção de analisar se o sistema estava funcionando de acordo com o esperado, ou seja, se os dois ramos do interferômetro teriam a mesma resposta para o mesmo estímulo de forma linear. A comparação da leitura dos dois detectores obteve a mesma resposta ao longo de um determinado curso. Entretanto, em alguns momentos, as leituras dos dois detectores tiveram comportamentos diferenciados com defasagem indesejada entre os dois. Essa defasagem é corrigida pelo próprio conjunto logo em seguida, o que nos leva

a crer que em certo momento o “T” sofre uma resistência mecânica maior em um de seus lados levando a uma defasagem no deslocamento desse braço que após vencer essa resistência é compensado. Levando em consideração que para aumentar a precisão do sistema proposto é necessário utilizar um intervalo grande com muitas medidas, esse problema é desprezível para o resultado final.

**Figura 24**– Parte representativa do gráfico dos dados de calibração para comparação do deslocamentos dos dois espelhos.



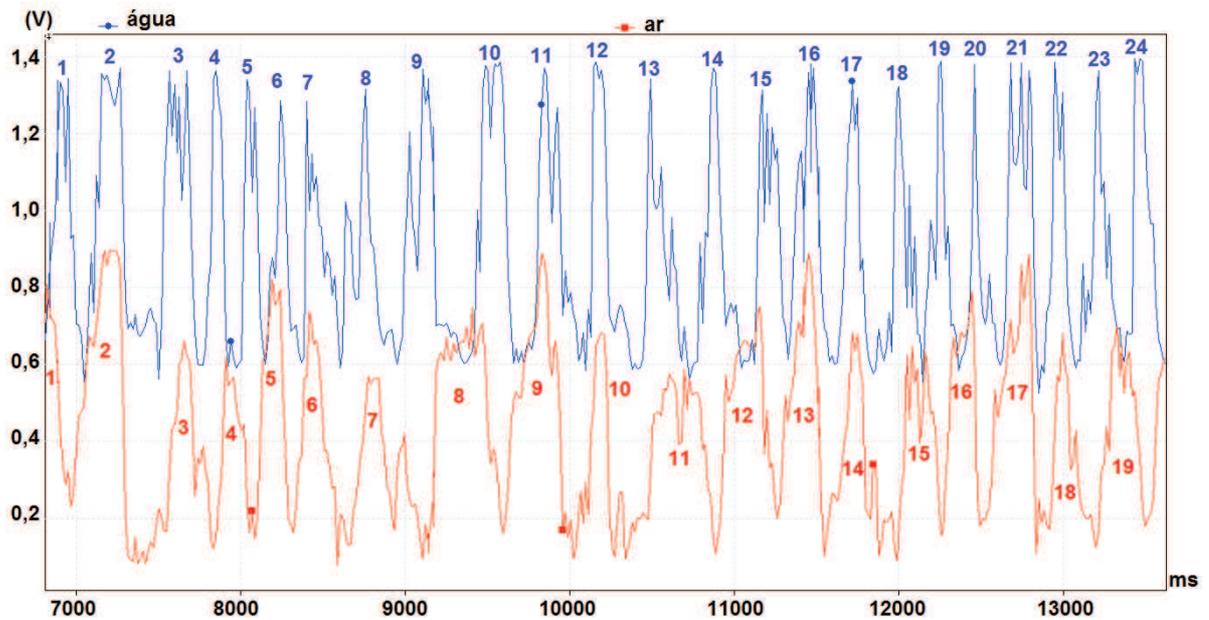
**Fonte:** O autor

Após ter feito as medidas de caracterização e ter constatado a linearidade no deslocamento ao longo de um intervalo amplo, um segundo gráfico é obtido com a leitura dos detectores sendo que um dos espelhos está submerso em uma cuba contendo água destilada como substância para medir o índice de refração. No período de 60 s, onde os espelhos sofrem o mesmo deslocamento, é possível contar através do recurso gráfico 186 máximos de interferência para a secção do arranjo usado como referência e 146 máximos de interferência para a secção do arranjo do espelho imerso na água.

O gráfico da Figura 25 mostra uma pequena parte da coleta dos dados que ilustra muito bem a variação dos máximos e mínimos ao longo de um determinado deslocamento. O

software coleta a tensão do detector em função do tempo. Apesar de as medidas utilizadas serem em função do deslocamento, a utilização do ramo do interferômetro fora da água serve justamente para medir esse deslocamento. Logo, para um determinado tempo temos o deslocamento registrado em um detector, e a diferença de caminho óptico registrado no outro.

**Figura 25** – Parte dos dados coletados com amostra de água destilada.



**Fonte:** O autor

Considerando a equação 15 deduzida anteriormente para a medida do índice de refração, para interferometria tendo um sistema de referência e outro para medir o índice de refração propriamente dito,

$$n_2 = \frac{\Delta m_2}{\Delta m_1} \quad (29)$$

podemos dizer que, através dos máximos e mínimos de interferência contados em ambos os gráficos registrados pelo software, temos a seguinte relação:

$$n_2 = 186/146$$

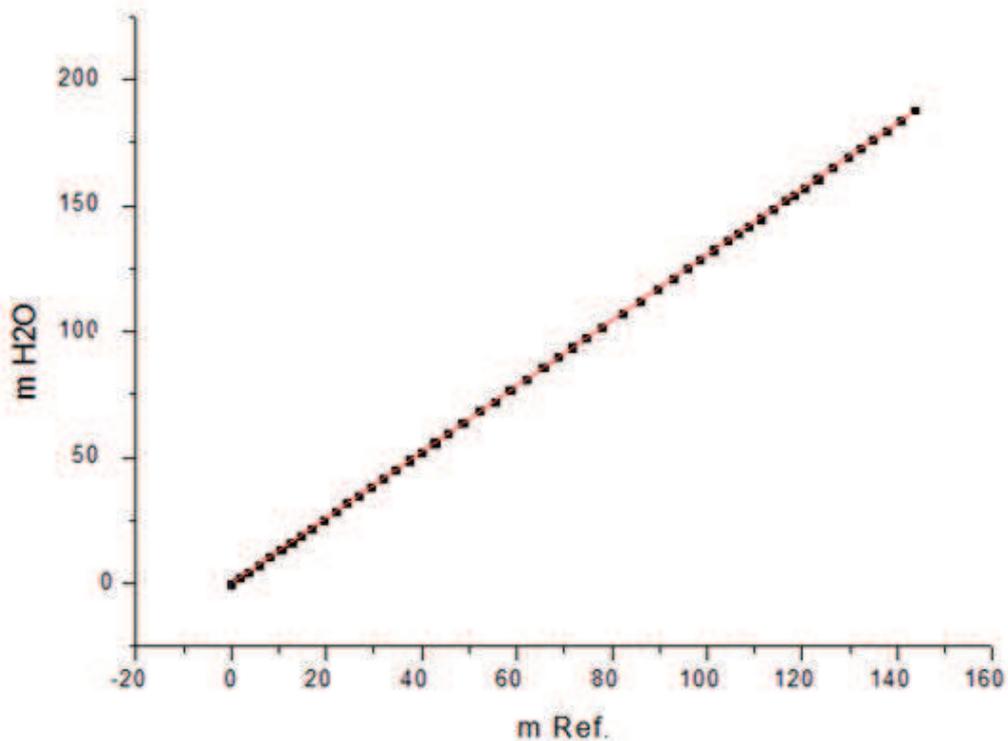
Portanto apesar da pequena quantidade de repetições que o arranjo é submetido,

pudemos conferir que o índice de refração encontrado para a amostra de água destilada é de  $1,27 \pm 0,06$ .

A incerteza foi obtida através de picos de máximo onde não foi possível se certificar graficamente se era apenas um ruído ou se era de fato uma variação de um mínimo para um máximo. Isso os permitiu concluir que apenas 3 algarismos significativos podem ser considerados. Considerando a margem de erro superior para as medidas coletadas, o índice de refração está de acordo com o esperado, entretanto a precisão dos dados obtidos foi baixa em comparação ao refratômetro de Abbe que consegue ter 1 casa a mais na precisão.

Um gráfico que mostra a relação entre as franjas deslocadas na referência em relação ao que foi deslocado na água foi plotado e pode ser visto na Figura 26. É possível notar que a parte imersa em água teve um deslocamento maior

**Figura 26:** Número de franjas deslocadas na referência e no líquido



Fonte: O autor

#### 4.2 Interferometria com deslocamento de apenas um espelho.

Para o segundo arranjo, conforme a figura 15 ilustra, as franjas inicialmente foram

contadas visualmente por duas pessoas simultaneamente. Após ter conferido o deslocamento das franjas por um determinado período de tempo igual para os dois, o que contou as franjas da parte superior, ou seja, no ar, encontrou 100 franjas deslocadas, enquanto que a contagem da parte inferior, ou seja, imersa em água, encontrou 128 franjas.

Utilizando-se da mesma dedução necessária para o primeiro arranjo, que utiliza a mesma ideia, podemos encontrar:

$$n = 1,28 \pm 0,02$$

Portanto apesar das poucas repetições que o arranjo foi submetido, pudemos conferir que o índice de refração encontrado para a amostra de água destilada é de  $1,28 \pm 0,02$ . Esse valor obteve um erro percentual de 3,6%. Comparado com o anterior, esse resultado é melhor. Para o cálculo de incerteza foi levado em consideração a defasagem de 2 franjas, uma por conta do momento de início da contagem e a segunda por conta do momento de término da contagem.

Entretanto, não é possível fazer uma leitura gráfica para esse caso, pois quando os detectores são colocados para fazer a contagem, esse valor não se repete. Isso se dá pelo fato do sistema mecânico responsável pelo deslocamento dos espelhos não se deslocar perfeitamente paralelo à incidência do laser; conseqüentemente, o padrão das franjas sofre alterações tais como orientação, devido à incidência da frente de onda ser diferente, e até mesmo no tamanho das franjas de interferência.

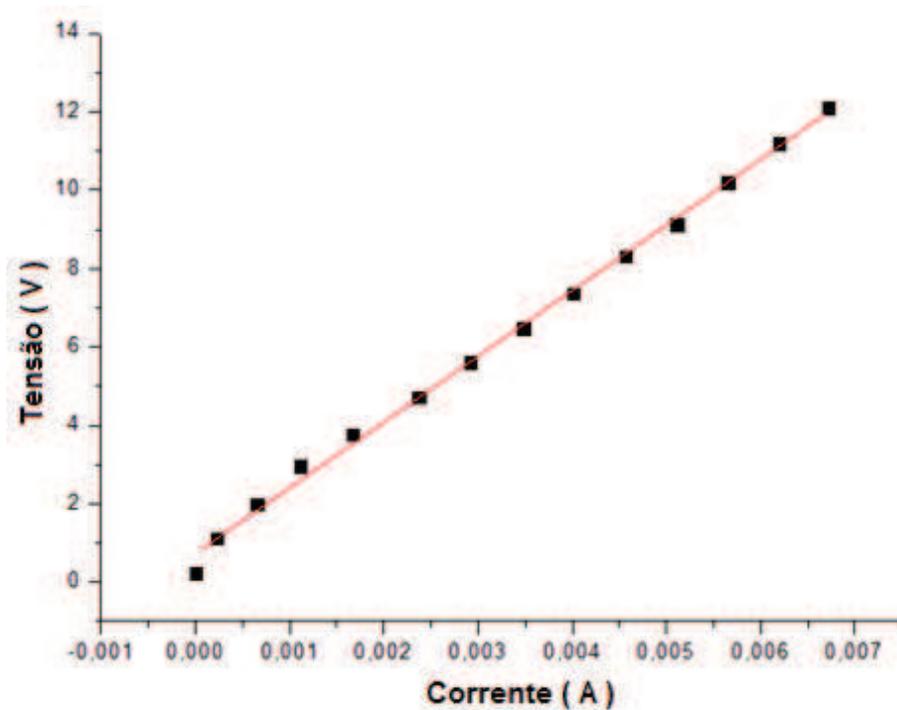
Esse problema pode ser resolvido com a utilização de um *corner cube* para garantir uma constância ou com um sistema mecânico mais confiável para o deslocamento dos espelhos.

Por termos resultados discrepantes em relação ao esperado, é possível notar a falta de confiabilidade devido à variação do padrão das franjas de uma parte em relação à outra. Portanto, para poder utilizar esse método, as correções tais como o deslocamento dos espelhos para manter constante o padrão de interferência e a redução de vibração são necessárias.

### 4.3 Interferometria por vibração dos espelhos.

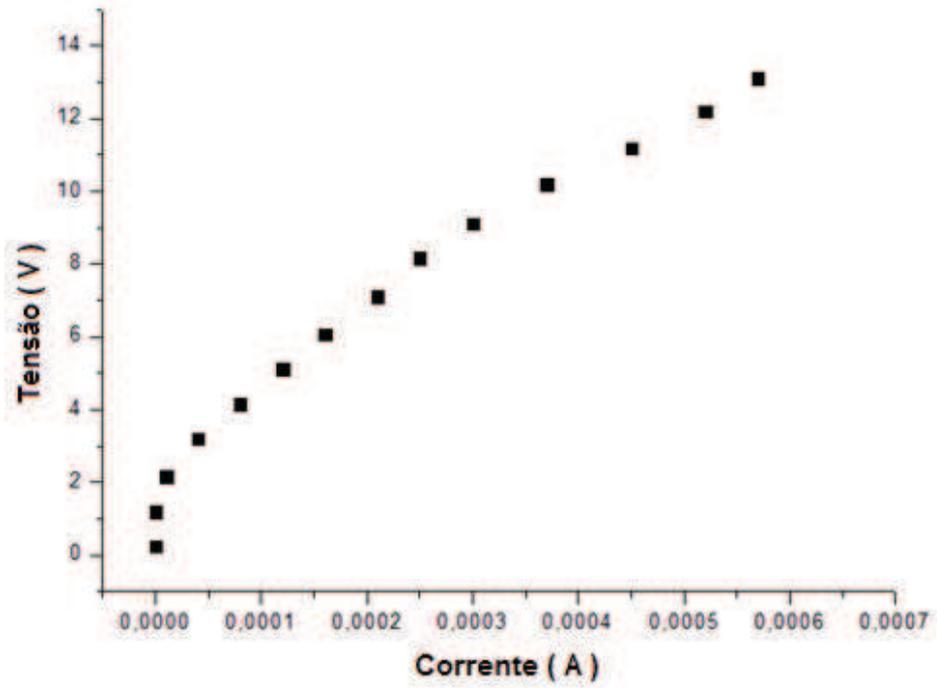
Para o terceiro arranjo, exemplificado no esquema da figura 18, é possível detectar que há uma defasagem no sinal emitido pelo gerador de funções. Isso pode se dar pela impedância do sistema. Uma verificação do canal A é feita para encontrar esse valor e qual a relevância deles para o arranjo de acordo com o gráfico da Figura 27. E posteriormente foi feita a mesma calibração, porém dessa vez para o canal B de acordo com o gráfico da figura 28. Em seguida, os dois foram comparados entre eles e assim foi possível se obter o gráfico da figura 29.

**Figura 27:** Calibração do Canal A



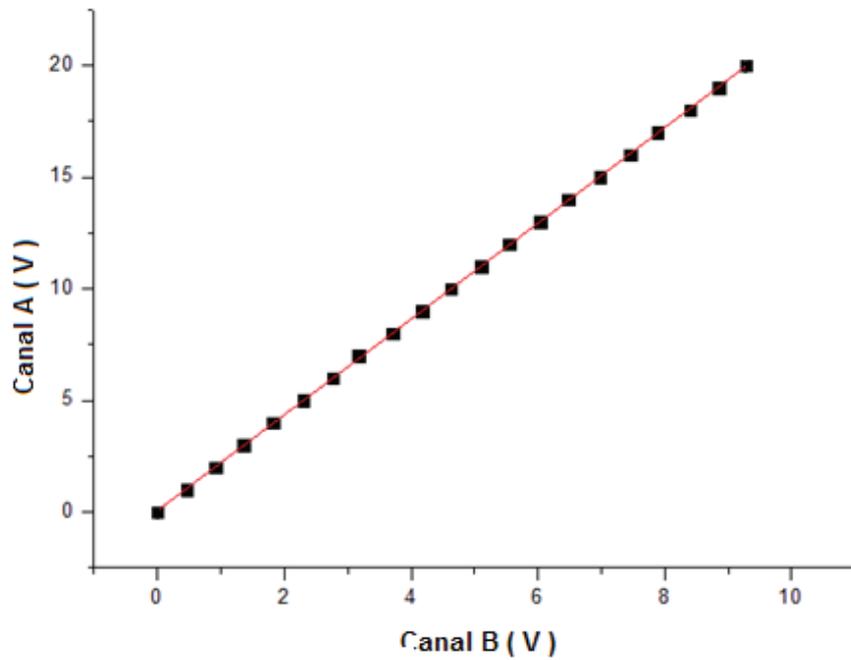
Fonte: O autor

Figura 28: Calibração do Canal B



Fonte: O autor

Figura 29: Resposta do Canal A em relação ao Canal B

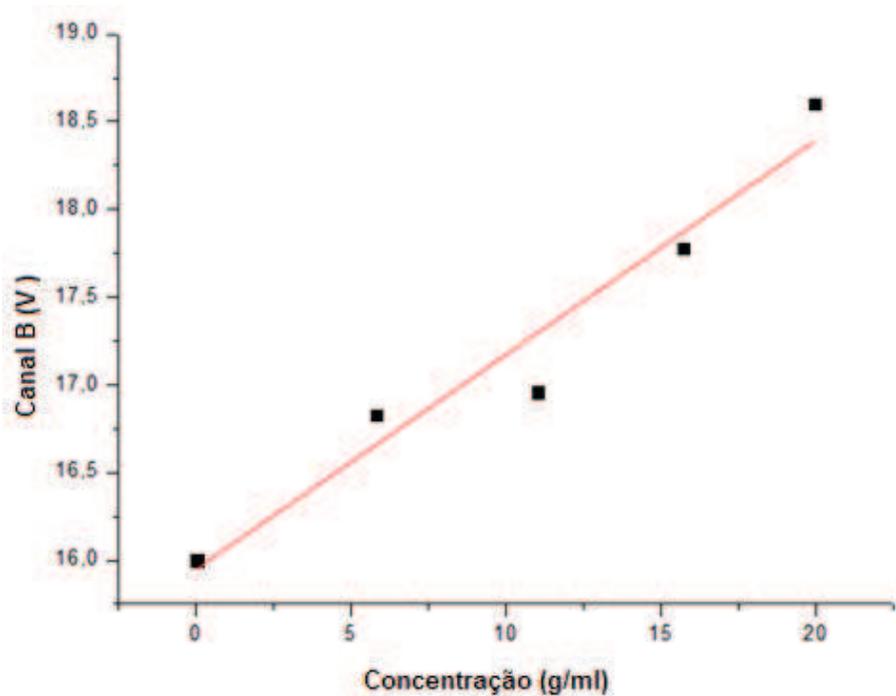


Fonte: O autor

Como mostra o gráfico da figura 29, as medidas do Canal A em relação ao Canal B são combinadas para saber a relação entre eles. É constatada uma repetição no padrão. Graficamente é confirmada a ideia de que os dois espelhos respondem de forma diferente quando recebem o mesmo estímulo do gerador de sinais devido a fatores tais como diferença na carga aplicada a cada atuador, cerâmicas piezoelétricas com diferenças de resposta entre elas, impedância nos cabos e até mesmo cargas diferentes em cada uma.

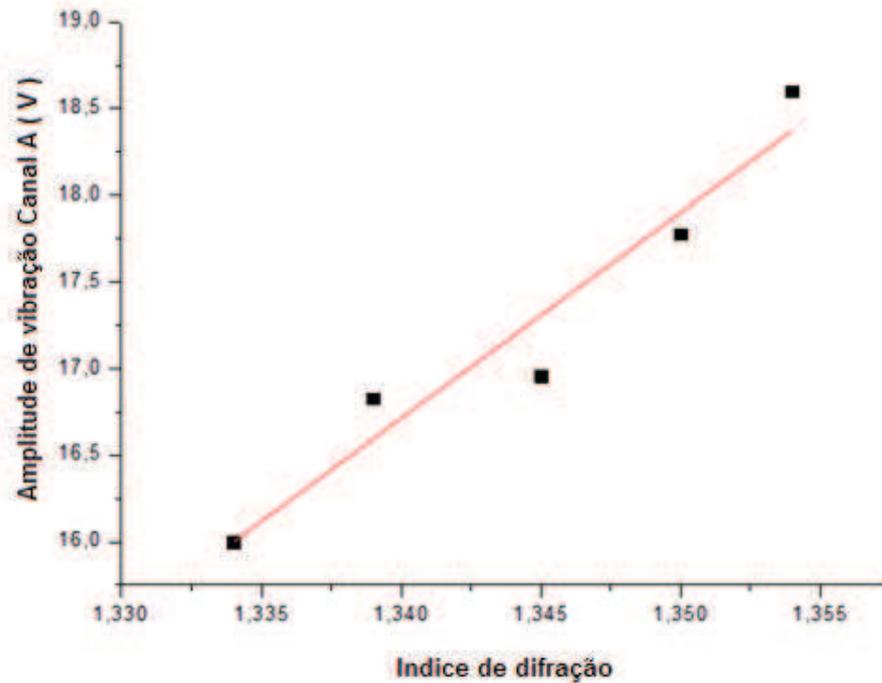
Após ter traçado esses gráficos para conhecer fatores relevantes nos resultados finais, foram feitas medidas para traçar uma curva para índices de refração de acordo com a concentração de água e álcool, como pode ser observado no gráfico da figura 30. Todos os valores medidos no dispositivo são previamente e posteriormente confirmados em um refratômetro de Abbe para poder certificar que a substância permaneceu homogênea durante todo o processo de análise. Outro gráfico que foi obtido foi para concentração de água com açúcar que pode ser visto na figura 31.

**Figura 30:** Relação entre amplitude de vibração e concentração de água/álcool



Fonte: O autor

**Figura 31:** Relação entre amplitude de vibração e índice de refração de concentrações de água com açúcar.



**Fonte:** O autor

Esse arranjo é prejudicado provavelmente pela instabilidade da rede elétrica onde são feitas as medidas. Essa instabilidade pode interferir na coerência do laser e até mesmo instabilidade no sinal enviado para as cerâmicas. Outro fator que pode ter atrapalhado a qualidade das mediadas são as vibrações externas. Por se tratar de um sistema muito mais sensível que os anteriores, vibrações mecânicas e até mesmo sonoras podem ter interferido, ainda pela vibração ser o fator analisado com essa técnica. Mesmo tendo sido montado em uma mesa apropriada, algumas vibrações podem não ser absorvidas pela mesa.

Um laser de He-Ne também é utilizado para se certificar se a coerência poderia ser um fator relevante para esses dados. No entanto é constatada apenas a facilidade visual de obter as franjas de interferência, mas nada com relação à estabilidade do sistema.

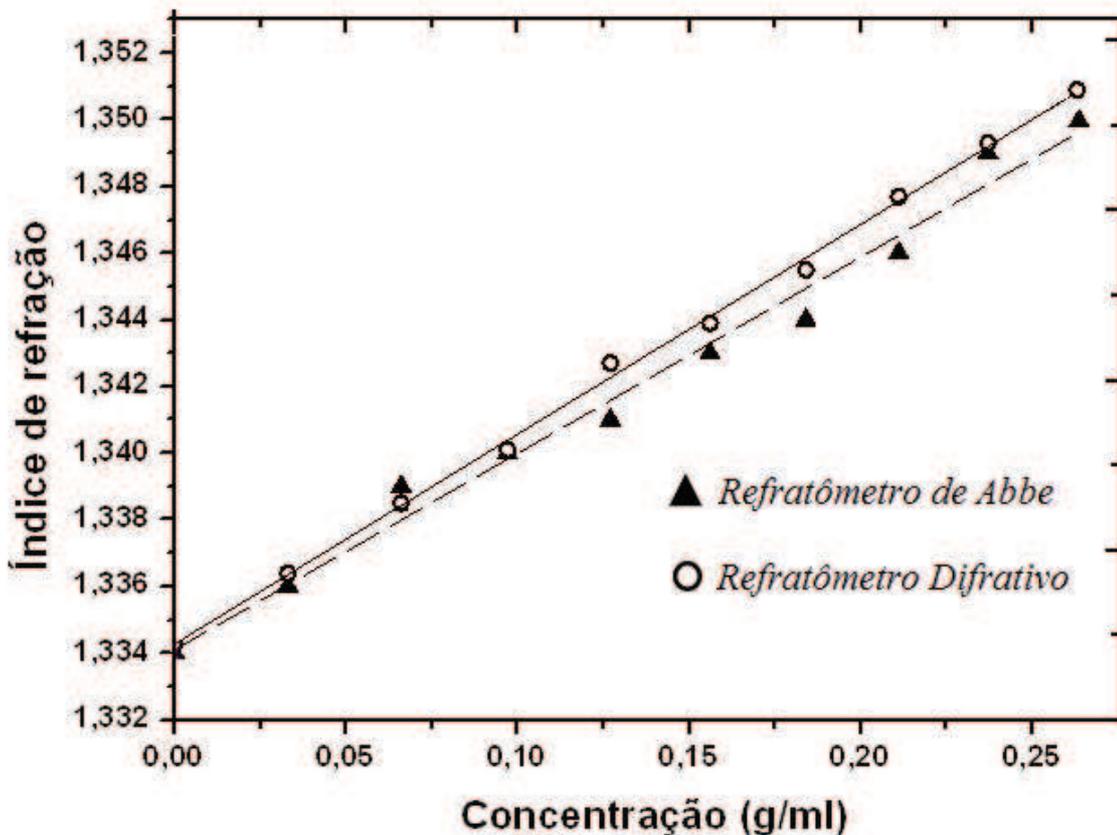
A reprodução do sistema não se mostra muito fácil. Dispositivos eletrônicos tais como sistemas de retroalimentação se mostram importantes para tornar o sistema replicável e confiável. Encontrando os dispositivos corretos espera-se uma grande precisão e um sistema simples, compacto e rápido para coletar as medias de índice de refração.

#### 4.4 Arranjo Difrativo Usando Espectrômetro Goniométrico

Para o quarto arranjo que foi esquematizado na figura 19, onde a técnica de difração é utilizada, em um primeiro momento o líquido analisado é uma amostra de água destilada com índice de refração nominal de 1,332 confirmado por um refratômetro de Abbe. Para essa medida é obtido um ângulo de incidência  $\alpha = 21,67^\circ$  e a rede utilizada tem um espaçamento entre as linhas de 848 nm. Fazendo os devidos cálculos de acordo com a equação 21, podemos obter um índice de refração de 1,33185. Segundo o site *refractiveindex.info* (2015), o valor da água destilada para o comprimento de onda emitido pelo laser He-Ne é 1,3317.

Em um segundo momento, tendo encontrado um valor de acordo com o esperado na literatura para a água destilada, utilizaram-se 10 amostras com diversas concentrações de água com açúcar, a rede de difração é substituída por uma rede para a qual  $d = 0,835 \mu\text{m}$ . O gráfico da figura 32 compara os valores obtidos pelo refratômetro difrativo e o de Abbe para quatro diferentes concentrações. É possível notar no gráfico que a limitação da escala do instrumento e a subjetividade proporcionam restrição na qualidade dos dados, ou seja, alguns pontos ficam fora da reta o que demonstra falta de exatidão nas medidas causando um erro maior do que o método difrativo. Fato esse não ocorre se a precisão na leitura é maior e que fica evidente na parte gráfica referente ao refratômetro difrativo que exibe um melhor alinhamento dos pontos que comprova a precisão e a exatidão dos dados coletados. Os pontos bem perfilados com a linha média demonstram que as medidas pelo refratômetro difrativo têm menor flutuação.

**Figura 32** – Relação entre medidas de concentração e índice de refração com refratômetro de Abbe e refratômetro difrativo



Fonte: O autor

As medidas de índice de refração conferidas pelo refratômetro de Abbe são tomadas antes e depois da amostra ser submetida à coleta de dados. Esse processo é aplicado para garantir que durante as medidas, a solução não sofra precipitação mudando o índice de refração, e isso é constatado pelos valores iguais nos dois momentos.

Um aspecto importante é o ângulo de incidência do laser na cuba. Esse ângulo necessariamente deve ser nulo, tal como o ângulo de saída da cuba, levando em consideração que a cuba tem um formato retangular, pois caso contrário o ângulo de incidência na rede ou na saída da cuba sofre uma alteração obedecendo à lei de Snell-Descartes. Com essa alteração isso pode gerar um desvio de forma que a luz não incida no centro da rede e propague um erro ainda maior para o ângulo de saída da luz da cuba, gerando uma leitura errada.

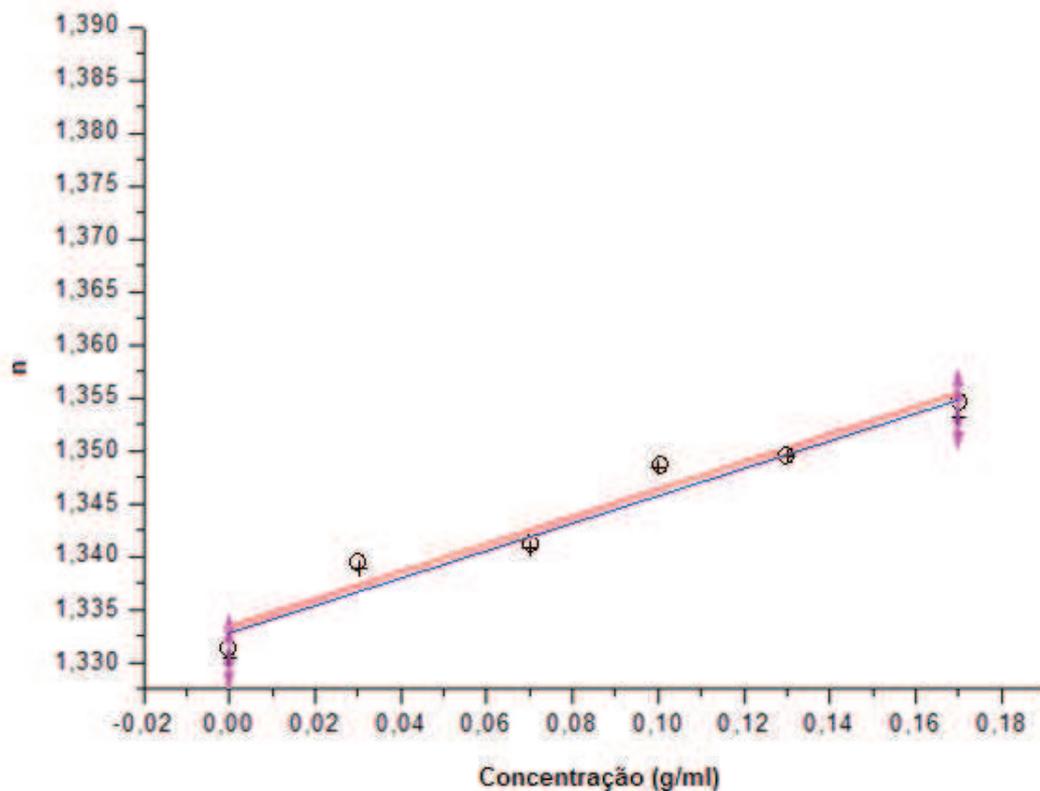
Para esse arranjo, temos uma incerteza na escala angular de  $0,015^\circ$ , sendo essa a metade da menor divisão possível. Dessa forma, se utilizarmos a equação 28, podemos calculá-la e

obter o valor dela para o índice de refração  $\pm 0,001$ .

#### 4.5 Arranjo Difrativo – Resultados Aprimorados

Após obter bons resultados na primeira montagem, um segundo arranjo foi montado com o objetivo de conseguir uma maior precisão. Levando em consideração que no arranjo anterior a precisão era de  $0,03^\circ$ , nesse arranjo essa limitação diminuiu para  $0,003^\circ$  como veremos mais adiante. De acordo com o gráfico da figura 33, um gráfico de concentração de água com açúcar em função do índice é feito de comparar a refração entre o refratômetro difrativo e o refratômetro de Abbe. Os gráficos apresentam valores bem reprodutivos, entretanto um erro sistemático é observado no momento em que os valores coletados pelo refratômetro estão visivelmente acima dos valores esperados.

**Figura 33** – Relação entre medidas de concentração e índice de refração com refratômetro de Abbe e refratômetro difrativo

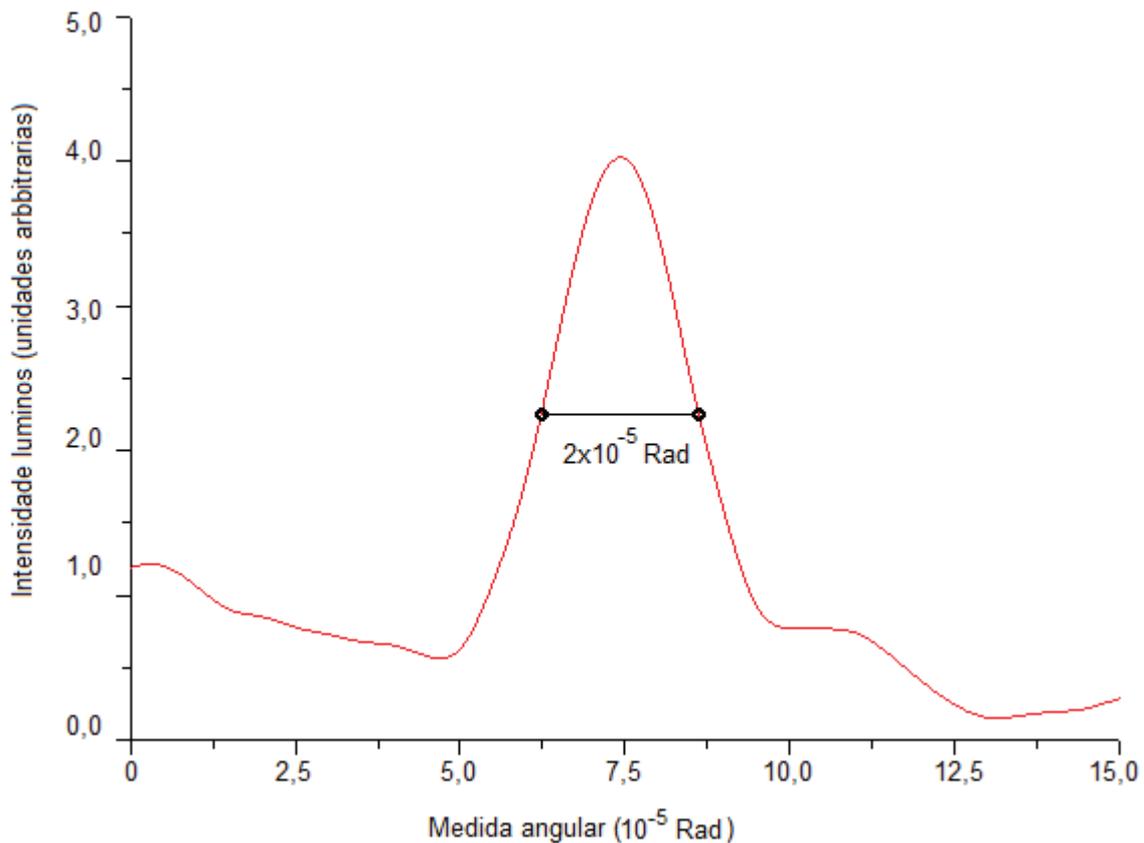


Fonte: O autor

Com a tomada de mais curvas é possível notar que a inclinação das retas é bastante reprodutiva. Entretanto elas sempre resultam em um valor superior ao refratômetro de Abbe. Esse problema pode ser compensado utilizando um fator de correção associado à posição do centro de rotação do braço móvel que pode estar ligeiramente deslocado.

Uma análise de incerteza foi feita levando em consideração o tamanho da imagem da fenda que é um fator limitante para a precisão desse arranjo. Foi capturado um registro da projeção da fenda que através de um programa chamado *imageJ* foi possível graficamente ver a variação de intensidade da luz em um determinado segmento linear da imagem capturada. Por essa medida como é possível observar no gráfico da figura 35, a intensidade luminosa da imagem da fenda tem uma distribuição gaussiana muito bem definida. Dessa forma um ponto médio dessa distribuição foi escolhido para definir o tamanho da imagem formada pela fenda. Esse valor obtido graficamente foi de 3,92 pixels. Levando em consideração que o comprimento da menor divisão da imagem da escala é de 340 pixels e que cada menor divisão corresponde a 12 minutos, podemos fazer uma correlação que nos resulta em uma incerteza angular de  $2,0 \times 10^{-5}$  rad.

**Figura 35** – Distribuição de intensidade luminosa por área



**Fonte:** O autor

Sendo que o cálculo de incerteza é feito com o auxílio da equação 30

$$\delta n = \left( \frac{\partial n}{\partial \alpha} \right) \Delta \alpha \quad (30)$$

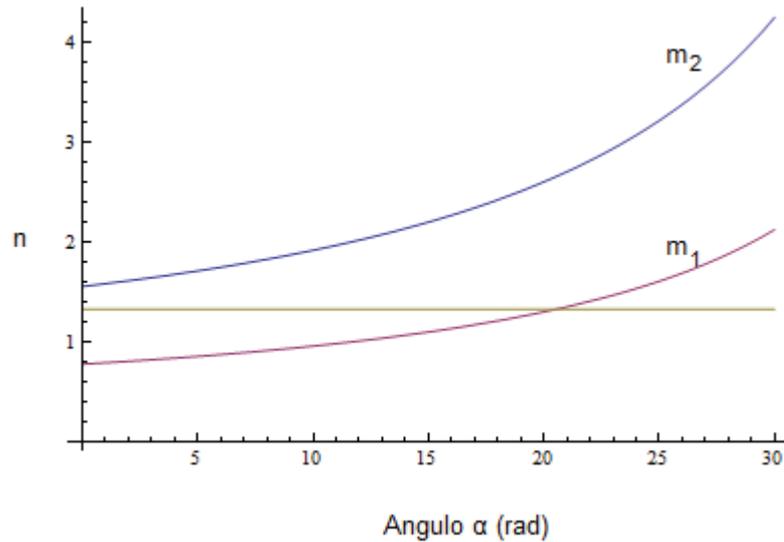
E sabendo que a derivada da equação (28) é

$$\frac{\partial n}{\partial \alpha} = \frac{\lambda (\cos \alpha + \sin \alpha)}{d (\cos \alpha - \sin \alpha)^2} \quad (31)$$

Substituindo (31) em (30) e utilizando o ângulo de  $21,5^\circ$  que equivale ao ângulo da água destilada, e sabendo  $\Delta \alpha = 2 \cdot 10^{-5}$ , obtivemos uma incerteza de  $6,17 \times 10^{-5}$ . Esse resultado nos permite considerar que a precisão desse arranjo chega até a quinta casa decimal.

Outro ponto avaliado do refratômetro difrativo foi a sensibilidade do dispositivo para índice de refração em relação ao ângulo  $\alpha$ . O gráfico da figura 36 mostra que em primeira ordem é possível se obter valores de índices de refração pequenos com uma sensibilidade grande. É possível se afirmar isso levando em consideração que a variação da curva é mais sutil nos índices de difração menores. Já para medidas de índice de refração superiores a 1,600 é mais vantajoso utilizar a ordem 2 de difração. Para esses valores, a curva da ordem 1 passa a ter uma inclinação mais intensa, e a sua derivada é maior, enquanto a ordem 2 tem uma derivada mais sutil.

**Figura 36**– Gráfico da sensibilidade angular em função da variação de índice de refração.



**Fonte:** O autor

## 5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos nesse trabalho demonstram que os conceitos físicos e matemáticos desenvolvidos ao longo de tantas décadas e que aqui foram aplicadas variações deles, são muito sólidos e atende a todas as propostas desse trabalho justificando assim as suposições e resultados obtidos ao longo dos testes de cada arranjo. Isso contribui para que seja possível explorar e investigar com segurança as outras fontes de interferência negativa que possam ter influenciado diretamente os resultados obtidos nos testes feitos com cada arranjo utilizado.

Hoje contamos com inúmeros recursos para solucionar essas interferências e fontes de ruído, porém é necessário além da aplicação, serem analisados se esses recursos não podem gerar outras interferências pejorativas ou o quão relevante é cada fonte de ruído no arranjo. É possível e necessário, encontrar soluções práticas, que não gerem novos ruídos ao sistema e também detectar outras variáveis que estejam interferindo e que não tenham sido encontradas ainda.

Todos os arranjos propostos necessitam de aperfeiçoamentos no que diz respeito à parte eletrônica e mecânica. A única exceção é o quarto arranjo onde dados precisos e exatos foram obtidos, e que a precisão da escala do equipamento foi utilizada até o seu limite resolutivo.

Para o primeiro arranjo, correções no modo de deslocamento dos espelhos para uma melhor linearidade na coleta de dados é necessário ser aplicado. Uma boa forma de se obter isso é utilizando o conceito aplicado no segundo arranjo onde foi usado apenas um espelho para ambos os segmentos interferométricos. A coleta de dados necessita também de um sistema mais sensível que possa registrar máximos e mínimos mais bem definidos distinguindo melhor dos ruídos. Uma opção para se obter esse resultado pode ser a utilização de um sistema de computação embarcada tal como o arduino que foi o que se tentou incrementar também no segundo arranjo.

Como foi comentado anteriormente, o segundo arranjo foi feito com a proposta de solucionar os problemas no deslocamento do primeiro arranjo, além de tentar implementar um sistema mais automatizado para fazer a coleta dos dados de forma mais confiável. Como resultado indireto, o arranjo ficou mais compacto e utilizou menos componentes ópticos pelo fato de ter utilizado alguns componentes em comum para os dois segmentos interferométricos. Através dos resultados obtidos foi possível comprovar que as melhorias surtiram efeito, entretanto novos problemas foram detectados.

O sistema de deslocamento dos espelhos exige que seja perfeitamente paralelo ao eixo de incidência do laser pois caso contrário, o padrão de interferência sofre alteração surtindo um problema na obtenção dos dados. Quanto ao sistema de coleta de dados, foi possível perceber que ele é funcional, Mas pode ainda ser aperfeiçoada a fim de eliminar a leitura equivocada de ruídos.

O problema do deslocamento do espelho não paralelo ao feixe incidente pode ser remediado com a utilização de um prisma do tipo *corne cube*. Esse prisma eliminaria o problema de um possível deslocamento angular pois ele permite que a luz retorne pelo mesmo caminho do feixe de incidência independente do ângulo de incidência. Dessa forma, o padrão de interferência formado após o divisor de feixes não se alteraria e tornaria possível a utilização de meios eletrônicos para se obter a leitura desse deslocamento de franjas sem se equivocar com a mudança dos padrões.

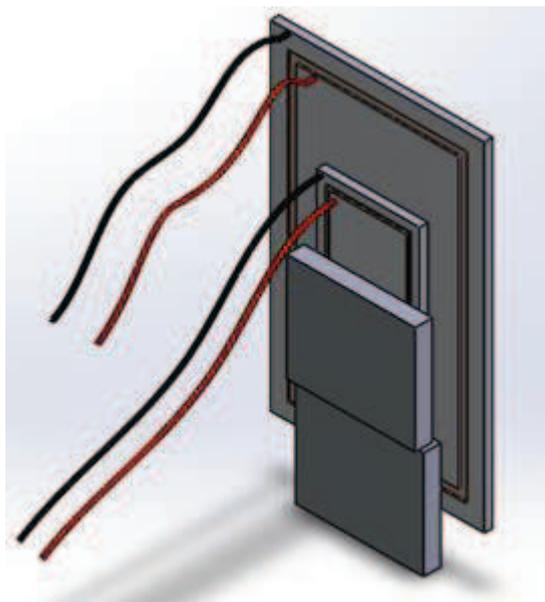
Para a coleta de dados, pode-se evitar a leitura equivocada devido a vibrações, utilizando as portas analógicas do sistema de computação embarcada. Dessa forma, os transdutores fariam uma leitura de uma amplitude de variação de luz ao invés de uma leitura binária. Com esse tipo de leitura é possível fazer um programa onde apenas os picos de máximo e mínimo sejam lidos e os valores intermediários sejam ignorados. Com esse programa, as variações que ocorressem sem passar pela transição de um máximo ou um mínimo seriam filtradas e desprezadas.

Para o terceiro arranjo é possível fazer uma curva de calibração para achar o erro do sistema devido ao valor divergente proveniente das diferentes respostas dos elementos presentes. Porém é necessário avaliar se apenas isso é suficiente, ou se é necessário fazer um segundo arranjo de forma a minimizar essas desarmonias.

Testes feitos a médio prazo mostraram que o sistema é muito instável e que as medidas coletadas nele são de difícil reprodução. Uma análise mais aprofundada é necessária para poder encontrar os reais motivos para que isto esteja acontecendo. Algumas alterações no ambiente foram inicialmente descartadas como fonte de uma possível interferência, mas não foi possível fixar nenhuma conclusão definitiva.

Uma opção de outro arranjo dentro desse conceito pode ser feita de forma que os dois espelhos sejam posicionados paralelamente. Um dos espelhos é fixado em um piezo elétrico em uma região inferior desse piezo elétrico. Um segundo espelho é fixado em um segundo piezo elétrico, e por sua vez, esse conjunto é fixado no primeiro piezo elétrico. Quando o sistema está apenas no ar, o primeiro piezo elétrico vibra os dois espelhos com as mesmas condições e as franjas de interferência não se deslocam. Quando o espelho inferior é imerso no líquido, as condições são alteradas, e portanto, há a necessidade de ligar o segundo piezo elétrico para compensar essa diferença gerada pelo índice de refração. Assim ele precisará apenas inserir a diferença responsável pelo índice de refração.

**Figura 27-** Esquema dos espelhos / piezoelétricos



**Fonte:** O autor

Para o quarto arranjo foi possível retirar todos os dados com qualidade satisfatória. A escala angular do dispositivo foi explorada ao máximo e tanto a precisão e exatidão atingiram o limite do que se poderia obter com ele, assim como foi explorado na discussão dos dados obtidos. Por conta disso um quinto arranjo foi feito a fim de dar uma maior liberdade para que essas medidas pudessem ser mais precisas levando em consideração que esse arranjo obteve 4 casas decimais por conta da limitação angular de  $0,03^\circ$ .

O quinto arranjo, apesar de ter dado bons resultados que obtiveram cinco casas de precisão, e ter necessitado da utilização de um fator de calibração para corrigir a exatidão dos valores, poderá ter de forma mecânica esses dados corrigidos.

Um sistema mecânico com alinhamento mais confiável para garantir a concentricidade entre os elementos e a fixação das lentes pode muito bem corrigir esse posicionamento que gera uma defasagem angular. Um sistema devidamente usinado de forma que a fixação desses elementos móveis sejam perfeitamente concêntricos pode eliminar algumas possibilidades de posicionamentos indevidos.

Outro ponto que pode ser aplicado é um sistema eletrônico para fazer a leitura dos dados, onde um motor de passo pode ser utilizado para girar a rede de difração e um sistema de computação embarcada ser utilizado para calcular através do passo do motor qual foi o ângulo que a rede girou. Para isso seria necessário um motor de passo com passos pequenos o suficiente para ter uma precisão grande. Isso eliminaria a necessidade utilização de uma câmera e também de um sistema de escala para medir a variação angular. Dessa forma o arranjo poderia ser mais compacto pois não necessitaria de um raio mínimo para acomodar a escala. Além desse fator, a capacidade de focalizar uma fenda menor pode também oferecer ao sistema um ganho de precisão.

O fato de cinco métodos terem sido testados demonstra que a gama de alternativas para a utilização de técnicas que utilizam a óptica ondulatória é muito grande. Algumas técnicas que poderiam permitir esse tipo de medidas não chegaram a ser testado nesse trabalho, porém, é possível encontrar na literatura alguns pesquisadores que já as utilizaram tal como arranjos holográficos por exemplo.

Esse trabalho conta com métodos sofisticados que exigem um grande grau de dedicação e demanda de tempo para serem colocados em prática. Tanto nos arranjos mais sofisticados quanto os arranjos mais simples, necessitam de cuidados específicos para eliminar erros

sistemáticos. Existem muitas possibilidades de focos de erros tais como desalinhamento, fixação instável dos componentes ou até mesmo o cuidado da limpeza da cuba onde a amostra do líquido é colocada. Apesar de alguns arranjos não terem chegado ao objetivo principal, eles se apresentam promissores desde que algumas alterações e aperfeiçoamentos sejam feitos para corrigir suas fontes de erro. Uma análise mais aprofundada também se faz necessária para que as possibilidades de fontes de erro sejam esgotadas.

Essas montagens precisam de uma quantidade de tempo significativa para sanar suas falhas e poder torna-las aplicáveis com resultados mais precisos e exatos. Alguns arranjos por si só já têm condições de serem utilizados nesse momento, porém, os que não tem, já tem uma indicação nesse trabalho de qual o caminho correto para se seguir e quais os detalhes que devem ser evitados para extinguir alguns erros e dessa forma poder aperfeiçoá-los.

Em termos de simplicidade, a técnica que vem se mostrando mais fácil de reproduzir, e fazer coletas de dados com o menor custo, é a técnica de difração. Essa técnica apesar de ter componentes ópticos caros tais como rede de difração e lentes oculares e objetivas, pode facilmente ser trabalhada com um laser de diodo de baixo custo por não necessitar de um laser de alta coerência além de ser menos sensível a interferências externas.

Quanto aos arranjos interferométricos, pode-se constatar que são arranjos muito sensíveis a interferências do tipo vibratórias ou até mesmo deslocamentos mecânicos irregulares. Alguns podem ser solucionados com recursos mecânicos de maior confiança e precisão, outros podem ser resolvidos com recursos eletrônicos. Pesquisas adicionais serão necessárias para constatar quais dispositivos podem oferecer a solução definitiva para os problemas e qual a viabilidade da utilização deles. Entretanto é possível constatar que no que diz respeito a parte óptica, os arranjos demonstraram-se eficazes, e com os devidos aprimoramentos, eles podem se tornar altamente promissores.

Existe uma possibilidade eminente de transformar esses trabalhos em produto. Os arranjos interferométricos podem ser muito uteis para trabalhos em laboratório levando em consideração a possibilidade de vibrações interferirem nos resultados. Já os arranjos difrativos podem ser utilizados para pesquisas de campo por contarem com um sistema que não é comprometido com vibrações e instabilidades mecânicas.

Esse trabalho até o momento vem como uma forma de vislumbrar para a comunidade a possibilidade de utilização de técnicas mais precisas e exatas além de somar ao conhecimento científico um avanço tecnológico que possa permitir a outros pesquisadores um ponto de partida

para seus trabalhos. Além da precisão e exatidão, esse trabalho conta com técnicas que podem utilizar uma pequena quantidade na amostra levando em conta que os elementos ópticos imersos no líquido podem ser pequenos. Dessa forma, é possível medir índice de refração de líquidos não muito translúcidos e até mesmo fluidos corporais que não estão disponíveis em grande abundância para análise.

As técnicas aqui apresentadas podem facilmente ser automatizadas tanto para tornar os dados facilmente coletados como para serem digitalizados para serem processados e armazenados em sistemas computacionais. Esse incremento pode facilitar a utilização em sistemas de controle de qualidade, para registro de informações em linhas de produções ou até mesmo para o envio de dados de um lugar distante para a comunicação entre diversos setores da produção.

Dessa forma é possível afirmar que essa proposta consolida a ideia das melhorias cabíveis aos sistemas estudados e assim substituir os equipamentos que vem sendo utilizado nos tempos atuais. Mesmo precisando de melhorias em alguns casos, o trabalho oferece mais opções para coletar medidas refratométricas. Muitas pesquisas, melhorias e trabalhos ainda podem ser feitos a partir do que está sendo apresentado nessa obra. Se trata de um leque de opções que pode envolver contribuições de profissionais da área de eletrônica, mecânica, programação e até mesmo engenheiros de processo.

## REFERÊNCIAS

- ABBE, E. **Double Prism for Totally Reflecting Refractometers**. 548.495, 22 Outubro 1895.
- BARBOSA, E. A. Design, construction, and performance of a real-time holographic refractometry prototype for liquid analysis. **Review of Scientific Instruments**, São Paulo, 21 January 2011. 1-7.
- FRANCESCONI, R. Correlation of density and refraction index for liquid binary mixtures containing polyglycols. Use of the group contributions in the Lorentz-Lorenz, Gladstone-Dale and Vogel equations to evaluate the density of mixtures. **Journal of molecular liquids**, Bologna, n. 133, p. 125-133, outubro 2006.
- GREEN, M. D. Corrigendum to "Use of refractometry and colorimetry as field methods to rapidly assess antimalarial drug quality". **Journal of pharmaceutical and biomedical analysis**, Atlanta, n. 43, p. 1890, Fevereiro 2007.
- HECHT, E. *Optics* 4<sup>a</sup> ed. India: Pearson, 2008.
- HUYGENS, C. *Treatise on light*. La Vergne, 2014
- KACHIRAJU, S. R. Determining the refractive index of liquids using a modified Michelson interferometer. **Optics & Laser Technology**, Huntsville, n. 44, p. 2361-2365, Maio 2012.
- KOECHNER, W. **Solid-State Laser Engineering**. 5<sup>a</sup> ed. Berlin: Springer, 1999.
- MACHLIN, E. S. *Materials Science in Microelectronics II: The Effects of Structure on Properties in Thin Films*. **Elsevier**, n. 2, p. 103-134, 2006
- MAKDISI, Y. Laser refractometry of liquids with a diffraction grating. **Optics Communications**, North-Holland, n. 72, p. 148-152, Julho 1989.
- MALHAM, I. B. Viscosities and refractive indices of binary mixtures of 1-butyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate and 1-butyl-2,3-dimethylimidazolium tetrafluoroborate with water at 298 K. **J. Chem. Thermodynamics**, Paris, n. 40, p. 718-723, outubro 2007.
- MAXWELL, J. C. A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, London, n. 155, p. 459-512, Janeiro 1865.
- MICHELSON, A. A. On the relative motion of the Earth and the luminiferous ether. **American Journal of Science**, New Haven, n. 203, p. 333-345, Novembro 1887.
- NICOLA, S. Reflective grating interferometer for measuring the refractive index of transparent materials. **Optics Communications**, Arco Felice, n. 118, p. 491-494, Agosto 1995.
- PENALVER, D. C. A. Inovação do processo de encapsulamento de sensores isolados do meio. **IX Workshop de pós-graduação e pesquisa do Centro Paula Souza**, São Paulo,

Outubro 2014

RICHE, M. Analysis of refractometry for determining total plasma protein in hybrid striped bass (morone chrysops x M. saxatilis) at various salinities. **Aquaculture**, Fort Pierce, n. 264, p. 279-284, 2007.

ROBERTS, M. C. **Arduino Básico**. 1<sup>a</sup>. ed. São Paulo: Novatec, 2011.

SANTIAGO NETO, R. B. S. Determinatio of absolute values of refractive index of liquids using an interferometric method. **Revista de Física aplicada e Instrumental**, Juiz de Fora, v. 17, n. 2, p. 74-79, junho 2004.

SUHADOLNIK, A. Na optical fibre interferometriac refractometer, **Measurement Science and Technology**, Ljubljana, n. 18, p 1205-1208, Setembro 2007.

SUN, Y. Design and performances of immunoassay based on SPR biosensor with magnetic microbeads. **Biosensors and bioeletronics**, Changchun, n. 23, p. 473-478, Julho 2007.

YU, H. Ultra compact and high sensitive refractive index sensor based on Mach-Zehnder interferometer. **Opticsand Lasers in Engineering**, Xiaogan, n. 56, p. 50-53, Janeiro 2014.

ZENG, L. A two-color heterodyne interferometer for measuring the refractive index o fair usign a optical diffraction grating. **Optics Communications**, Ibaraki, n. 203, p. 243-247, Março 2002

ZIRK, K. A refractometry-based glucose analysis of body fluids. **Medical Engineering & Physics**, Herdecke, n. 29, p. 449-458, 2007.

WATTANA, P. Study of asphaltene Precipitation Using Refractive Index Measurement, **Petroleum Science and Technology**, v. 21, p. 3-4, 2003.

## ANEXO 1

### Programa para controlar motor de passo e contar franjas de interferência

```
#include <LiquidCrystal.h>
```

```
int Pin1 = 9;
```

```
int Pin2 = 10;
```

```
int Pin3 = 11;
```

```
int Pin4 = 12;
```

```
int sensor1 = 8;
```

```
int sensor2 = 7;
```

```
int contador1 = 0;
```

```
int contador2 = 0;
```

```
boolean auxiliar1 = false;
```

```
boolean auxiliar2 = false;
```

```
LiquidCrystal lcd(6, 5, 4, 3, 2, 1); // Indica os pinos que serão utilizados pelo LCD
```

```
void setup() {
```

```
  lcd.begin(16, 2); // inicializa o display indicando quantidade de linhas e caracteres
```

```
  pinMode(sensor1, INPUT); // Seta o pino do LDR
```

```
  pinMode(sensor2, INPUT);
```

```
  pinMode(Pin1, OUTPUT);
```

```
  pinMode(Pin2, OUTPUT);
```

```
  pinMode(Pin3, OUTPUT);
```

```
pinMode(Pin4 ,OUTPUT);

}

void loop() {

{

if(digitalRead(sensor1)) { // LDR está conduzindo?

lcd.setCursor(0, 0); // posiciona o cursor do display

lcd.print("Maximo: ");

lcd.setCursor(8, 0);

if(auxiliar1){ // a variável auxiliar é verdadeira?

contador1++; // acrescenta mais um ao contador

auxiliar1=false; // torna variável em false

}

}else {

auxiliar1 = true;

lcd.setCursor(0, 0);

lcd.print("Minimo: ");

lcd.setCursor(8, 0);

}

}

}

lcd.print(contador1); // exhibe no display quantas vezes a porta abriu.

}

{

if(digitalRead(sensor2)) { // LDR está conduzindo?

lcd.setCursor(0, 1); // posiciona o cursor do display
```



```
digitalWrite(Pin1, LOW);  
digitalWrite(Pin2, LOW);  
digitalWrite(Pin3, HIGH);  
digitalWrite(Pin4, LOW);  
delay(100);  
digitalWrite(Pin1, LOW);  
digitalWrite(Pin2, LOW);  
digitalWrite(Pin3, LOW);  
digitalWrite(Pin4, HIGH);  
delay(100);  
}  
}
```