

Marcos Alexandre Cavalcante de Araújo

*Medidas Interferométricas do Índice de Refração de
Líquidos*

João Pessoa - PB

Dezembro / 2011

Marcos Alexandre Cavalcante de Araújo

Medidas Interferométricas do Índice de Refração de Líquidos

Dissertação apresentada à Coordenação do Programa de Pós Graduação em Física da Universidade Federal da Paraíba como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Mestre em Física.

Orientador:

Prof. Dr. Paulo Cesar de Oliveira

MESTRADO EM FÍSICA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA NATUREZA
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

João Pessoa - PB

Dezembro / 2011

Dissertação de Mestrado sob o título “*Medidas Interferométricas do Índice de Refração de Líquidos*”, defendida por Marcos Alexandre Cavalcante de Araújo e aprovada em 09 de Dezembro de 2011, em João Pessoa, Paraíba, pela banca examinadora constituída pelos doutores:

Prof. Dr. Paulo Cesar de Oliveiraa
Departamento de Física - UFPB
Orientador

Prof. Dr. Cláudio Lenz Cesar
Instituto de Física - UFRJ

Prof. Dr. Thierry Passerat de Silans
Departamento de Física - UFPB

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha família, em especial minha esposa, Terezanísia, e filho, Carlos, pelo apoio durante as fases boas e as mais difíceis da minha formação.

Também dedico aos estudantes que queiram, por meio deste trabalho, seguir adiante, dando novas soluções e avançando cada vez mais nas técnicas experimentais de metrologia, em especial a interferometria.

Agradecimentos

Meus sinceros agradecimentos para:

- o Professor Doutor Paulo Cesar de Oliveira, pela orientação neste trabalho e pela experiência nas outras linhas de pesquisa do Grupo de Ótica Não Linear;
- todos os colegas, funcionários e professores do Departamento de Física;
- ao CNPq, pelo financiamento, por meio de bolsa, durante o mestrado.

Resumo

Esta dissertação de mestrado é o resultado do projeto para o desenvolvimento e automação de refratômetros de alta precisão, que tem como objetivo a obtenção do índice de refração de líquidos com precisão de uma parte em 10^6 . Durante o desenvolvimento do projeto foram estudadas algumas técnicas de medidas interferométricas, assim como métodos de controle e medição de deslocamento. Foi utilizada a água deionizada como líquido objeto de estudo. Existem mais fontes bibliográficas com medições em água destilada, no entanto a água deionizada é também considerada pura, e as propriedades são bastante similares, apesar de possuírem aplicações específicas distintas. A análise termo-ótica da água pura, com alta precisão, permite a observação do comportamento anômalo na curva do índice de refração em temperaturas acima de $36\text{ }^{\circ}\text{C}$, e tal comportamento pode ser observado com poucas medições utilizando o equipamento que será descrito.

Palavras-chave: interferometria, refratometria, índice, refração, água

Abstract

This dissertation is the result of the project for the development and automation of high-precision refractometers, which is to obtain the refractive index of liquids with an accuracy of one part in 10^6 . Some interferometric measurement techniques, methods of measurement and movement control were studied during the development of this project. Deionized water was used as object of study. There are more bibliographic source with measurements in distilled water than deionized water but both are considered pure, and properties are quite similar, although they have different specific applications. The thermo-optical analysis of pure water with high accuracy allows the observation of anomalous behavior in the refractive index curve at temperatures above $36\text{ }^{\circ}\text{C}$ above, and such behavior can be observed with few measurements using equipment described here.

Conteúdo

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Introdução	13
1 O Refratômetro	14
1.1 O Refratômetro de Marteau	14
1.2 O Refratômetro de Richerzhagen	15
1.3 Refratômetro com Laser	16
1.4 Estabilização mecânica	18
1.5 Estabilização climática do ar	18
2 Refratividade	22
2.1 Índice de refração do ar	23
2.2 A equação empírica	23
2.3 Contribuição dos constituintes na refatividade do ar	24
2.3.1 Dependência com a concentração de CO_2	25
2.3.2 Dependência com o vapor de água	25
2.4 Medições em tempo real e correções à equação empírica	26

3	Controle de temperatura da amostra	28
4	Controle e medição automatizados	31
4.1	Controle e aquisição de dados	31
4.2	Medição automatizada	32
5	Processamento dos dados	34
6	Fontes de erros	37
6.1	Alinhamento	37
6.2	Aberrações de interferência e a temperatura	40
6.3	Alinhamento e efeito Moiré	41
6.4	Desvio angular	45
6.5	Contagem de franjas	46
7	Índice de refração de líquidos	48
7.1	A água deionizada	48
7.1.1	Índice de refração da água deionizada	49
7.1.2	Análise termo-ótica da água com formação de lente térmica	50
7.1.3	Análise interferométrica da água deionizada	52
	Conclusão	57
	Perspectivas	59
	Bibliografia	60

Apêndice A – Contagem de franjas

62

Apêndice B – Dados experimentais

64

Lista de Figuras

1.1	Esquema do Refratômetro de Marteau	15
1.2	Esquema do Refratômetro de Richerzhagen. O laser 2 monitora o deslocamento do espelho.	15
1.3	Arranjo ótico do duplo-interferômetro	17
1.4	Índice de refração do ar em função da pressão atmosférica. $dn/dP _{ar} \approx 3 \times 10^{-7} \text{ mmHg}^{-1}$	19
1.5	Índice de refração do ar em função da temperatura. $dn/dT _{ar} \approx -1 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. . .	19
1.6	Índice de refração do ar em função da umidade relativa. $dn/d(\text{UR}) _{ar} \approx -1 \times 10^{-8} \text{ \%}^{-1}$	20
1.7	Variação das condições climáticas durante a medição ar-ar	20
1.8	Foto da bancada experimental em atividade.	21
3.1	Esquema do controle de temperatura	28
3.2	Foto em detalhe da cubeta com a água deionizada e o sistema de controle de temperatura.	30
4.1	Interface do programa de aquisição.	33
5.1	Pontos experimentais e tentativa de ajuste por curva senoidal	35
6.1	Transformada de Fourier dos sinais ar-ar.	38
6.2	Franjas com temperatura do líquido instável (esquerda) e após passado o tempo de estabilização (direita).	39
6.3	Estabilização da temperatura do líquido observada pelo deslocamento das franjas com o espelho parado.	39
6.4	Feixe de laser varrendo volumetricamente a amostra líquida.	40

6.5	Realce no deslocamento de 3 franjas devido à diferença de temperatura no volume monitorado pelo feixe de prova.	41
6.6	Padrão esperado da figura de interferência.	42
6.7	Figuras do padrão Moiré demonstrando nível de alinhamento do interferômetro através do grau de inclinação relativa entre as grades.	42
6.8	Relações entre as distâncias das franjas do padrão de interferência e o comprimento de onda do feixe de laser.	44
6.9	Relação entre as distâncias entre franjas na figura de interferência ampliada, pela lente, e a figura real.	44
6.10	Representação da alteração do caminho ótico dos feixes devido a imperfeição no alinhamento dos espelhos.	45
6.11	Resultado do índice de refração em função do número de franjas.	47
7.1	Água deionizada - Dependência do índice de refração com a temperatura no intervalo entre 15,55 °C a 40,73 °C.	53
7.2	Trecho do gráfico da dependência do índice de refração com a temperatura. . .	54
7.3	Água deionizada - Dependência do índice de refração com a temperatura no trecho com anomalia.	55
7.4	Água deionizada - Derivada negativa do índice de refração com a temperatura, obtido dos pontos da interpolação do conjunto completo dos dados.	55
7.5	Água deionizada - Comparação com os resultados de Hawkes para a taxa de variação do índice de refração com a temperatura.	56
7.6	Água deionizada - Diferença entre os resultados obtidos por Hawkes e o nosso.	56
A.1	Exemplo gráfico do algoritmo de contagem das franjas. Os círculos são as ocorrências positivas dos testes, resultando $13 \times (0,25 \text{ franja}) = 3,25 \text{ franjas}$. .	63

Lista de Tabelas

2.1	Coeficientes da equação 2.7 para pressão de vapor saturado.	26
6.1	Medição sem amostra. Laser de referência e de prova passando pelo ar. Índice de refração n_1 calculado pela equação de Edlén e n_2 obtido a partir da relação entre o número de franjas N_1 e N_2	38
7.1	Água deionizada. N - número de franjas, P - pressão barométrica do ar (mmHg), T - temperatura ($^{\circ}\text{C}$), UR - umidade relativa do ar (%), n - índice de refração para luz de comprimento de onda de 638,2 nm	49
7.2	Resultado da análise estatística dos dados da Tabela 7.1.	50
B.1	Água deionizada. n - índice de refração para luz de comprimento de onda de 632,8 nm, T - temperatura do líquido em $^{\circ}\text{C}$	64
B.2	Água deionizada. n - índice de refração para luz de comprimento de onda de 632,8 nm, T - temperatura do líquido em $^{\circ}\text{C}$	65

Introdução

Pode-se dizer que a luz é fonte de vida. Sem a luz do nosso Sol não estaríamos vivos agora. O estudo do comportamento da luz, assim como a forma com que ela se comporta ao interagir com a matéria é algo que faz parte da história da ciência. Todo conhecimento novo é importante.

Quando a luz atravessa um meio transparente a sua velocidade muda, e a relação entre as velocidades de propagação da luz nos dois meios é chamada de índice de refração. A luz refrata, desvia, quando muda de meio de propagação. Estudando o índice de refração de um determinado meio, pode-se obter propriedades relevantes a aplicações científicas e industriais.

Trabalhamos na Automação de um Refratômetro Interferométrico. Os resultados obtidos durante este trabalho serão de grande importância para o projeto que vem sendo realizado pelo Grupo de Ótica Não-Linear e Instrumentação: Desenvolvimento de um Refratômetro Interferométrico de Alta Precisão. O sistema deverá realizar a medição, com alta precisão, do Índice de refração de um meio líquido transparente. A dependência com a temperatura também é observada, com ênfase na estabilidade térmica e mecânica durante a medição, monitorada com sistema computadorizado. Com o sistema controlando simultaneamente desde os processos mecânicos envolvidos até a aquisição dos dados, o resultado final terá um maior grau de confiabilidade.

Este sistema de alta precisão, na determinação do índice de refração, pode se usado para caracterização de líquidos que podem ser usados para calibração de outros equipamentos, de menor custo, e na execução de estudos comparativos com outras técnicas que avaliem propriedades refrativas em líquidos.

1 O Refratômetro

Existem diversos modelos de refratômetros no mercado, muitos deles utilizam luz não coerente para a medição. Os mais comuns, como o refratômetro de Abbe [10], chegam a obter resultados com duas ou três casas decimais. Este e o refratômetro de Pulfrich [13], fazem medição a partir do ângulo refratado da luz devido a presença da amostra, usando prismas, ambos dependem tanto da precisão do ângulo medido quanto do conhecimento do índice de refração do prisma utilizado.

O refratômetro que foi desenvolvido no Laboratório de Instrumentação Ótica (LIO) é baseado nos interferômetros de Marteau [12] e Richerzhagen [19].

1.1 O Refratômetro de Marteau

No trabalho de Marteau, o refratômetro utiliza dois lasers e o espelho deslocado dentro da amostra varia o volume do líquido analisado, como um tipo de pistão. A base móvel que desloca este espelho faz parte da cubeta. O feixe de laser que passa pelo ar monitora o deslocamento do espelho, e tem comprimento de onda fixo. Para o feixe de prova, que atravessa a amostra, foram utilizados vários comprimentos de onda das regiões do espectro visível e infra vermelho. As medidas realizadas por este refratômetro possuem erro da ordem de 10^{-4} . A precisão é resultado da contagem de franjas ser em torno de 40000, com o deslocamento de 12 mm do espelho, além de a contagem de franjas ser digital e processar apenas valores inteiros. Foram avaliados diversas soluções, mas apenas para a temperatura de 24,85 °C.

A equação 1.1 foi utilizada para obter o índice de refração do líquido com esta montagem.

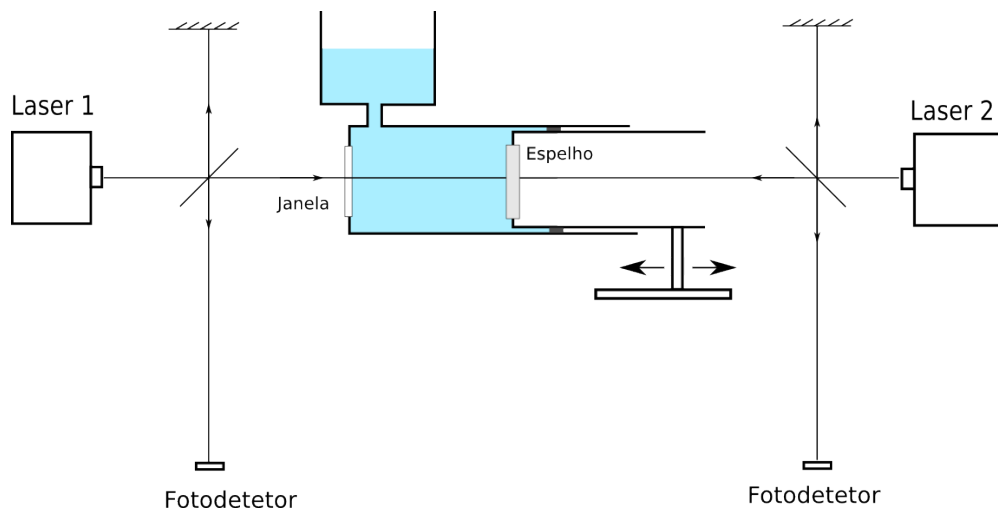


Figura 1.1: Esquema do Refratômetro de Marteau

$$n_{liq} = n_{ar} \frac{N_{liq}}{N_{ar}} \frac{\lambda_{\text{Infravermelho/HeNe}}}{\lambda_{\text{He-Ne}}} \quad (1.1)$$

1.2 O Refratômetro de Richerzhagen

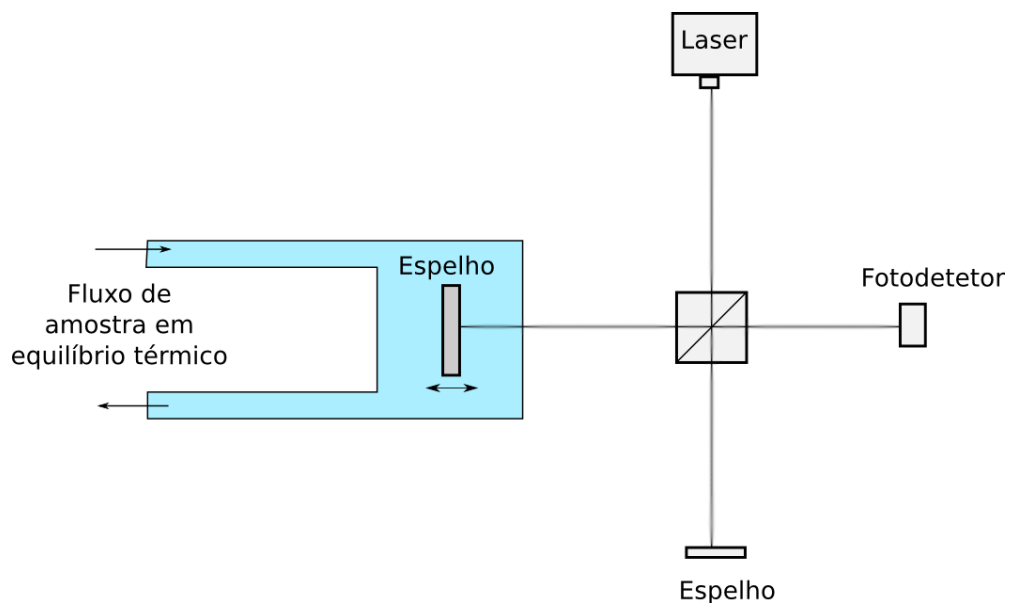


Figura 1.2: Esquema do Refratômetro de Richerzhagen. O laser 2 monitora o deslocamento do espelho.

Na montagem utilizada por Richerzhagen, o interferômetro é montado com um laser de Nd:YAG, utilizando o comprimento de onda de $1063,9 \mu\text{m}$. Não foi utilizado feixe de referência, no entanto houve o controle do deslocamento do espelho na amostra. Conhecendo o

comprimento de onda e o deslocamento do espelho, o índice de refração do líquido foi calculado pela equação 1.2:

$$n_{liq} = \frac{N\lambda}{2z}, \quad (1.2)$$

sendo N o número de franjas, λ o comprimento de onda e z o deslocamento do espelho.

Richerzhagen obteve um erro menor que 2×10^{-4} . Foram feitas medidas no índice de refração da água nas temperaturas entre 20 e 60 °C, com precisão de $\pm 0,1$ °C.

1.3 Refratômetro com Laser

Como contribuição deste trabalho, em relação às montagens de referência, temos a eliminação da necessidade do controle de deslocamento. Como os dois espelhos deslocam-se igualmente, a distância percorrida não precisa ser medida.

Outra diferença entre as montagens citadas e o refratômetro desenvolvido no Laboratório de Instrumentação Ótica (LIO), é a utilização de dois feixes provenientes de um único laser, neste caso, o de He-Ne. Deste modo, garantimos a coerência entre os sinais de referência e de prova. No trabalho feito por Daimon [4], para a água pura a 21,5 °C, a dispersão cromática nas proximidades do comprimento de onda 632,8 nm é dada por $dn/d\lambda = -0,0263\mu\text{m}^{-1}$.

O arranjo ótico experimental pode ser visto na Figura 1.3, e o controle de temperatura, que será descrito mais adiante, na Figura 3.1.

Foi utilizado um laser com intensidade estabilizada e comprimento de onda de 632,8 nm, cujo feixe atravessa um conjunto de prismas (P1) que os transmite em caminhos paralelos. Em seguida, os feixes atravessam um prisma divisor de feixes (P2) e seguem caminhos nos dois braços do duplo-interferômetro. No braço dos espelhos móveis, o feixe de referência irá percorrer no ar, refletido por um dos espelhos (E1) presos na base móvel (BM). O outro espelho (E2), irá refletir o feixe que atravessa a amostra líquida dentro da cubeta (C). No braço do espelho fixo, apenas um espelho (E3) irá refletir os dois feixes. Ao final do percurso, os feixes irão sofrer interferência em direção a duas lentes divergentes (L) posicionadas diante de fotode-

tetores (F1 e F2), cujos sinais são enviados a um amplificador e transmitidos ao computador por um conversor analógico-digital.

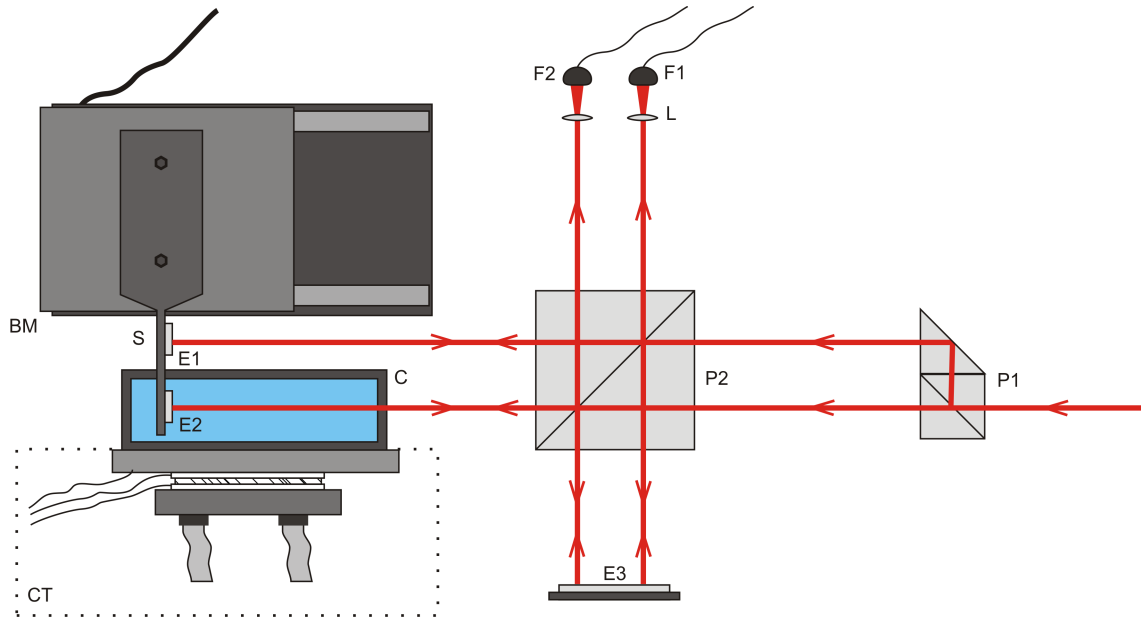


Figura 1.3: Arranjo óptico do duplo-interferômetro

Quando o espelho E1 percorre uma distância ΔL , a variação do caminho ótico no ar, medida pelo interferômetro de referência, é dada por:

$$2n_{ar}\Delta L = \lambda N_{ar}, \quad (1.3)$$

na qual n_{ar} é o índice de refração do ar, λ é o comprimento de onda do laser e N_{ar} é o número de franjas contadas no sinal do fotodetector F1.

O deslocamento do espelho E2 é determinado pelo interferômetro de prova, cujo feixe se propaga pelo líquido, este deslocamento é dado por:

$$2n_{liq}\Delta L = \lambda N_{liq}, \quad (1.4)$$

na qual n_{liq} é o índice de refração do líquido, λ é o comprimento de onda do laser, e N_{liq} é o número de franjas contadas pelo fotodetector F2. Combinando as equações 1.4 e 1.3, considerando que os deslocamentos ΔL idênticos, obtém-se:

$$n_{liq} = n_{ar} \frac{N_{liq}}{N_{ar}} \quad (1.5)$$

A equação 1.5 permite obter o índice de refração da amostra através da contagem das franjas de interferência durante o deslocamento dos espelhos dos interferômetros, usando o índice de refração do ar no entorno da amostra, por onde passa o feixe de referência.

1.4 Estabilização mecânica

Como todo experimento em ótica, além do alinhamento dos feixes, a estabilidade mecânica é sempre um dos principais problemas a ser resolvido antes de começar as medições.

Foi utilizada uma base da Newport sobre uma mesa de granito, de aproximadamente 600 quilogramas. Entre a mesa e a base utilizamos blocos de espuma prensada para amortecer vibrações menores. A estabilidade foi observada na medição de precisão, contando as franjas de interferência no deslocamento, a 0.17 mm/s, adquirindo 1350000 pontos dos dois interferômetros passando pelo ar, sem a cubeta, o que resultou em mais de 145000 franjas com diferença máxima de um quarto de franja na contagem entre os dois caminhos.

1.5 Estabilização climática do ar

Uma cobertura acrílica foi montada ao redor de todo arranjo experimental, suavizando oscilações das condições climáticas no momento da medição.

A estabilidade das variáveis de pressão, temperatura e umidade relativa do ar, no entorno do interferômetro, deve ser cuidadosamente observada. No cálculo do índice de refração do ar, como já visto, utilizou-se a equação de Edlén (2.8). Resultados de simulações numéricas com esta equação podem ser vistas nos gráficos das Figuras 1.4, 1.5 e 1.6, nos quais está realçado o valor da inclinação da reta, demonstrando o grau de influência das variáveis climáticas no valor do índice de refração do ar. A estabilidade destas variáveis durante a aquisição dos dados da Tabela 6.1, medindo ar e ar, pode ser observada na Figura 1.7.

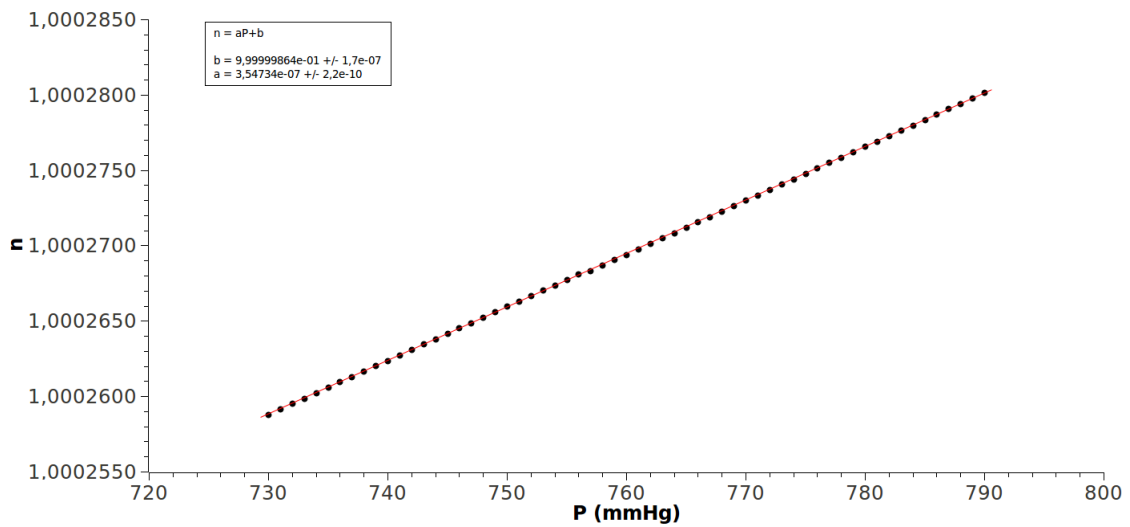


Figura 1.4: Índice de refração do ar em função da pressão atmosférica. $dn/dP|_{ar} \approx 3 \times 10^{-7} \text{ mmHg}^{-1}$

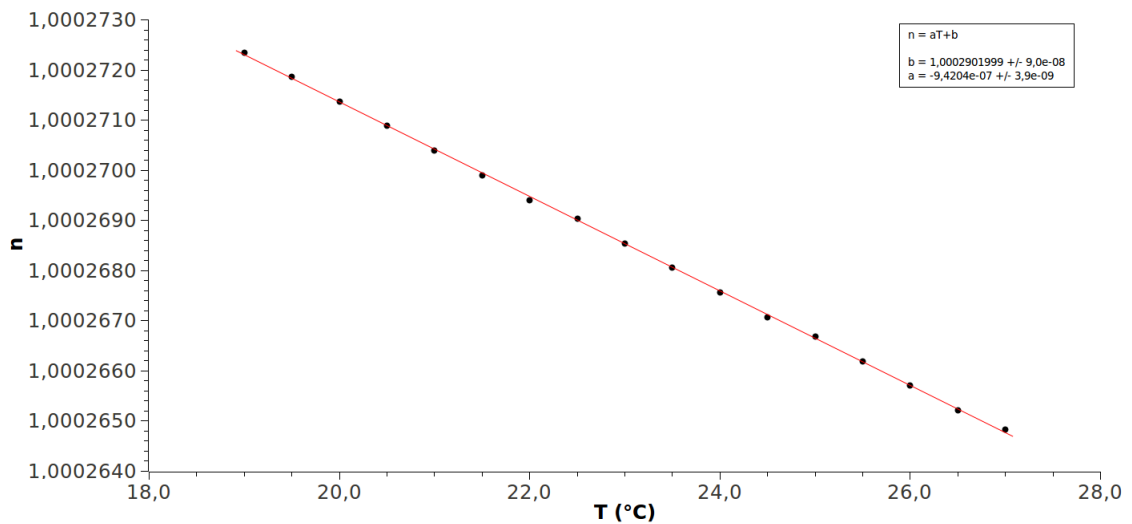


Figura 1.5: Índice de refração do ar em função da temperatura. $dn/dT|_{ar} \approx -1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

De acordo com os gráficos simulados da dependência do índice de refração do ar com as variáveis de pressão, temperatura e umidade relativa, tem-se que o maior desvio observado no valor do índice de refração está na dependência com a temperatura, sendo de aproximadamente $1 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Na Figura 1.7, estão os valores medidos das condições climáticas do refratômetro parado. A maior variação ocorreu na umidade relativa do ar, que foi de $0,15 \text{ } \%^{-1}$.

Durante cada ciclo de medidas, as maiores variações de pressão, temperatura e umidade relativa do ar foram de $0,1 \text{ mmHg}$, 1°C e 5% , respectivamente, contribuindo com uma incerteza de $3,5 \times 10^{-8}$, $9,4 \times 10^{-8}$ e $4,8 \times 10^{-8}$, ou seja, abaixo de 1×10^{-6} .

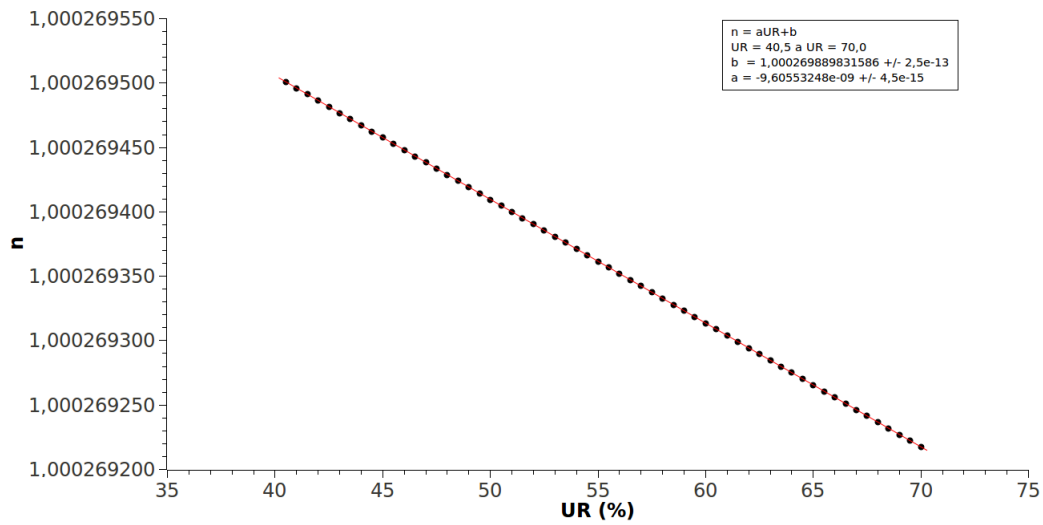


Figura 1.6: Índice de refração do ar em função da umidade relativa. $dn/d(UR)|_{ar} \approx -1 \times 10^{-8} \%^{-1}$

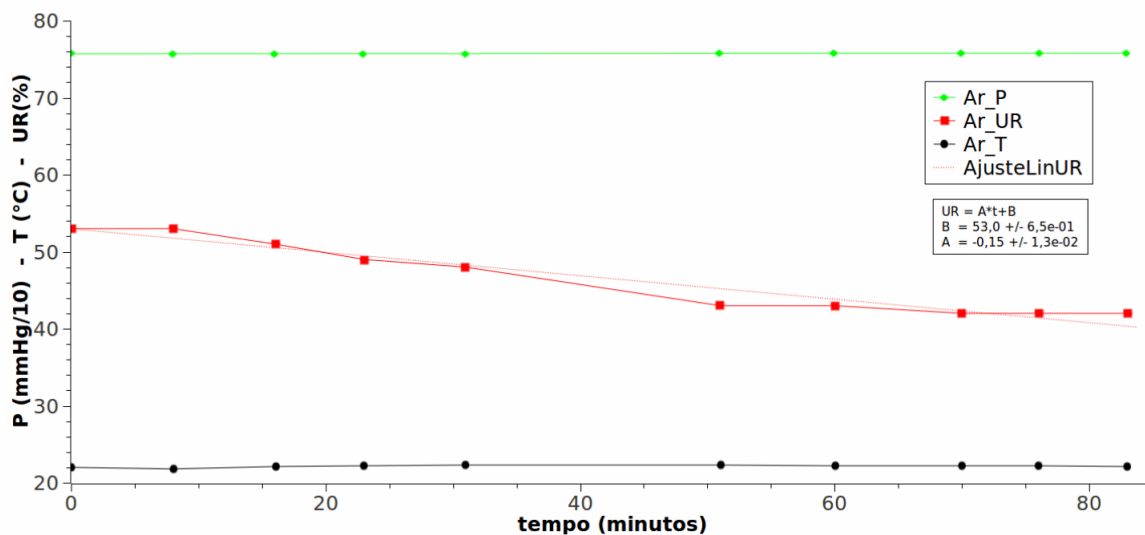


Figura 1.7: Variação das condições climáticas durante a medição ar-ar

A estabilidade das condições climáticas é obtida pelo confinamento dos interferômetros numa caixa acrílica. A influência da evaporação da amostra no ambiente é pequena durante a medição, mesmo acima da temperatura ambiente (30-40°C), que pode ser observada tanto pelas medições como pela contagem no deslocamento das franjas mantendo os espelhos parados.

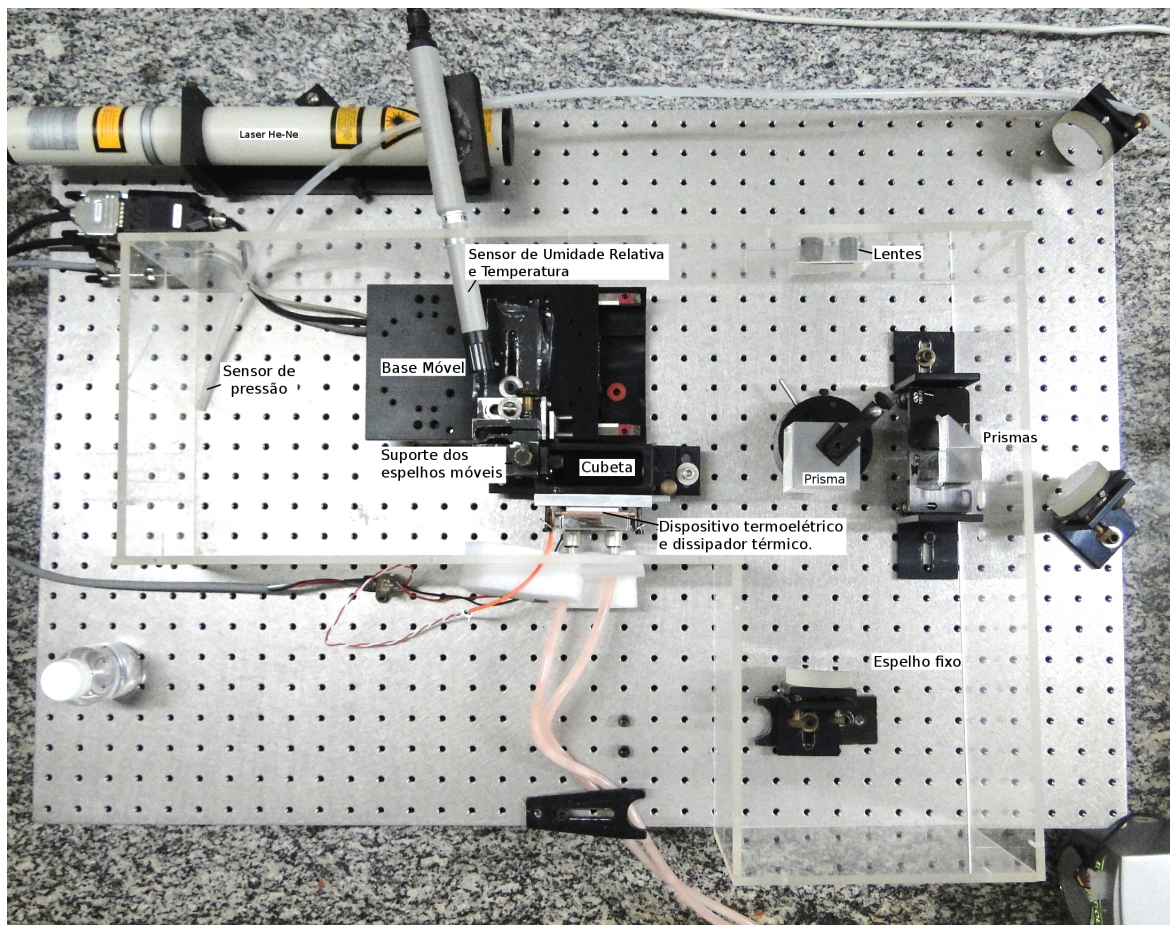


Figura 1.8: Foto da bancada experimental em atividade.

2 *Refratividade*

A matéria interage com ondas eletromagnéticas. O efeito da interação destas ondas no meio dependem das propriedades da onda, assim como das características do meio incidente. No cotidiano, é possível observar, sem a necessidade de equipamentos especiais, algumas destas características relativas à interação da radiação com a matéria.

Esta característica que um meio tem de desviar, ou refratar, a luz chama-se refratividade. O que ocorre com a onda é a mudança de velocidade ao passar de um meio a outro com característica diferente. A relação entre as velocidades entre os meios é conhecida como índice de refração, não possui unidade e o valor atribuído ao vácuo é 1.

Em líquidos, pode-se observar a variação no valor do índice de refração, em relação ao ar, em função da temperatura, pureza ou mistura com compostos específicos. Na indústria alimentícia, é comum usar a escala de Brix [5], que relaciona a refratividade com a quantidade de sólidos solúveis, de modo a saber a quantidade de açúcares diluídos, por exemplo, numa amostra de suco ou vinho. A escala relaciona a porcentagem de concentração de sucrose¹ na solução com o índice de refração medido por alguma técnica refratométrica.

A caracterização de uma amostra por seu índice de refração, também permite avaliar evolução de organismos celulares, assim como a variação nos padrões de qualidade que afetem o meio.

¹Sucrose, também conhecida como sacarose, é o açúcar obtido geralmente da cana-de-açúcar, frutas ou beterraba.

2.1 Índice de refração do ar

Com o uso do laser na metrologia, faz-se necessário conhecer o índice de refração do ar no local com maior precisão. O comprimento de onda utilizado na medição deve ser corrigido do seu valor no vácuo para o valor no ambiente de índice de refração n_{ar} , considerando, portanto, o comprimento de onda no ar ambiente como o sendo:

$$\lambda_{\text{ar}} = \frac{\lambda_{\text{vácuo}}}{n_{\text{ar}}} \quad (2.1)$$

Estudos foram feitos na determinação de uma equação empírica para o cálculo do índice de refração do *ar padrão*² [6], com base no trabalho de Barrel e Sears [1]. Ao longo dos anos, algumas modificações foram feitas à equação de Edlén com o objetivo de simplificar sua utilização [15], e ainda melhorar a precisão no valor do índice de refração do ar considerando mais variáveis.

2.2 A equação empírica

Bengt Edlén [6] derivou uma fórmula de dispersão para o ar padrão com base em medidas feitas com luz visível e ultravioleta, separadamente por outros autores [1]. Com a análise dos dados experimentais de Barrel e Sears, Edlén fez o ajuste baseando-se em uma sequência da forma de Cauchy ($n - 1 = a + b/\lambda^2 + c/\lambda^4$) que, com algumas modificações, obteve a seguinte equação para a refratividade do ar padrão:

$$(n - 1)10^8 = 6432,8 + \frac{2949810}{146 - \sigma^2} + \frac{25540}{41 - \sigma^2} \quad (2.2)$$

na qual, σ é dito o número de onda no vácuo em μm^{-1} .

Edlén [7] corrigiu a própria fórmula, mudando alguns termos do ajuste e obtendo a seguinte equação para o ar padrão:

²O ar padrão foi definido como ar seco à pressão de 760 Torr e temperatura de 15 °C, que era considerado ambiente comum à média dos laboratórios no início do século XX.

$$(n-1)_p 10^8 = 8342,13 + \frac{2406030}{130 - \sigma^2} + \frac{15997}{38,9 - \sigma^2}, \quad (2.3)$$

Edlén alega que esta modificação pouco afetaria nos resultados da maioria das aplicações em espectroscopia. No entanto, este trouxe uma atualização mais eficiente em termos práticos. Uma nova equação foi derivada, com base em considerações teóricas que possibilita calcular a refratividade em ambientes que não estejam nas condições do ar padrão.

A nova equação de Edlén para a refratividade do ar, além de depender do comprimento de onda da luz utilizada, agora considera a temperatura e a pressão atmosférica no local da medida. Esta nova equação é uma correção ao valor obtido para o ar padrão. Com a fórmula de dispersão para o ar padrão (equação 2.3), a equação pode ser escrita como:

$$(n-1)_{TP} = (n-1)_p \times \frac{0,00138823P}{1 + 0,003671T}, \quad (2.4)$$

com a pressão P dada em $mmHg$, e a temperatura T em graus Célsius. No intervalo de temperatura entre 15 e 30 °C, e de pressão entre 700 e 800 $mmHg$, o índice de refração n apresenta desvio menor que $1,0 \times 10^{-8}$.

Nos artigos de estudo da refratividade do ar, existe a diferença entre o ar seco e o vapor de água contido no ambiente. Estes dois constituintes, mais o CO_2 , têm suas contribuições, na refratividade do ar, avaliadas separadamente.

2.3 Contribuição dos constituintes na refratividade do ar

Para experimentos de alta precisão, dependendo da qualidade do ar, pode ser necessário também medir a contribuição na refratividade pela presença individual dos gases presentes. Em condições normais, o dióxido de carbono e o vapor de água presente no ar seco são avaliados separadamente e inseridos como termos de correção na equação da refratividade do ar padrão.

2.3.1 Dependência com a concentração de CO_2

No caso do CO_2 , cuja concentração normal (0,03% por unidade de volume) contribui com uma pressão parcial de 0.23 Torr [7], de modo que a contribuição na refratividade padrão é de $4,5 \times 10^{-8}$. Boa parte das equações da bibliografia utilizam a unidade de Torr para a pressão, como o fator de conversão é $1\text{mmHg} = 1.00000015001$ Torr, devido a estabilidade da pressão durante os experimentos, o grau de influência deste valor no cálculo do índice de refração permite considerar uma identidade entre estas duas unidades.

Mesmo que haja um aumento na quantidade de dióxido de carbono no ambiente onde são feitas as medidas de refratividade, a quantidade deste gás ainda será muito pequena para ultrapassar uma contribuição da ordem citada. Deste modo, é possível garantir precisão da equação de Edlén da ordem de 10^{-7} sem a necessidade de considerar influência no valor da refratividade do ar devido a contribuição deste gás.

2.3.2 Dependência com o vapor de água

Outro constituinte do ar atmosférico que pode ser considerado é o vapor de água. Neste caso, a influência na refratividade do ar é bem maior, variando cerca de 4 a 8×10^{-7} [7] com uma concentração de 2% de vapor no volume de ar total.

Também baseado nos trabalhos de Barrell e Sears [1], Edlén ajustou uma correção na dispersão do ar para admitir a contribuição do vapor de água, dada pela pressão parcial deste contida no ar total. Uma equação que pode ser utilizada para dar conta desta correção é a seguinte:

$$n_{TPf} - n_{TP} = -f(5,722 - 0,0457\sigma^2) \times 10^{-10} \quad (2.5)$$

na qual n é o índice de refração do ar em respeito às variáveis no índice, sendo T, P e f a temperatura ($^{\circ}\text{C}$), pressão barométrica e pressão parcial do vapor de água (mmHg), respectivamente. Permanecendo a notação $\sigma = 1/\lambda$, com λ sendo o comprimento de onda em micrômetros.

A umidade relativa do ar é a razão entre a quantidade de vapor de água contido no ar e a massa máxima de vapor de água que este ar pode conter até se condensar, normalmente expressa

Tabela 2.1: Coeficientes da equação 2.7 para pressão de vapor saturado.

B	$-3,8358214$
E_0	$-6,7777203 \times 10^3$
E_1	$5,4409359 \times 10^1$
E_2	$-8,0404143 \times 10^{-3}$
E_3	$7,1544503 \times 10^{-6}$

em porcentagem. Na equação 2.5 temos f como sendo a pressão parcial do vapor de água. Para simplificar o trabalho de medir esta pressão parcial, recorreremos a uma relação entre estas duas variáveis de forma simples:

$$U = \frac{f}{f_s} \times 100 \quad (2.6)$$

sendo U a umidade relativa do ar, f_s a pressão parcial de vapor de água no ponto de orvalho, ou ponto de saturação, em Pascal.

Ao medir, durante o experimento, a umidade relativa do ar, já obtemos indiretamente estas outras variáveis que são dependentes tanto da umidade quanto a temperatura do ambiente [9]. Para obter o valor para f_s , foi utilizada a seguinte equação:

$$\ln f_s = B \ln(T + 273,15) + \sum_{i=0}^n E_i (T + 273,15)^{i-1} \quad (2.7)$$

Nesta equação, obtida por Wexler e Greenspan [22], são usados os coeficientes contidos na Tabela 2.1 e a temperatura, T , deve estar em Celsius.

2.4 Medições em tempo real e correções à equação empírica

É possível fazer a medição do índice de refração do ar, ao invés de calcular, durante a medição do índice de refração do líquido. No entanto, para tal precisaríamos de outra bancada experimental do mesmo porte da que está sendo utilizada, além de uma célula de vácuo controlada. Todo este trabalho para ter uma precisão na nona casa decimal [20].

Este maior controle não é necessário devido à estabilidade das condições climáticas obser-

vada. Várias correções foram feitas com o passar dos anos, desde os primeiros trabalhos de Edlén, e algumas correções bastante relevantes foram obtidas a partir de comparações com o resultado obtido com a equação e medições de alto controle feitos no laboratório de metrologia ótica e mecânica do *National Physical Laboratory* (em Teddington, Middlesex - UK), por Birch e Downs [2], cujos resultados apresentam incerteza de $\pm 3.3 \times 10^{-8}$, que já o é suficiente para garantir nossos resultados.

Com este último trabalho citado, mas utilizando seus coeficientes atualizados posteriormente pelos mesmos autores [3], que atualiza os parâmetros da equação 2.5, e a equação 2.3 para o ar padrão, escolhemos a equação a ser utilizada para a análise dos dados experimentais obtidos no Laboratório de Instrumentação Ótica da UFPB, como sendo:

$$n_{TPf} - n_{TP} = -f(3,7345 - 0,0401\sigma^2) \times 10^{-10}, \quad (2.8)$$

com

$$\begin{aligned} n_{TP} &= n_p \times \frac{P}{96095,43} \times \frac{1 + 10^{-8}(0,601 - 0,00972TP)}{1 + 0,003661T} + 1, \\ n_p \times 10^8 &= 8342,13 + \frac{2406030}{130 - \sigma^2} + \frac{15997}{38,9 - \sigma^2}, \text{ e} \\ f &= \frac{U \times f_s}{100} \end{aligned} \quad (2.9)$$

na qual f_s é dada pela equação 2.7, $\sigma = 1/\lambda$, com λ sendo o comprimento do laser usado em micrômetro, P a pressão atmosférica em Pascal, T a temperatura do ar em graus Celsius.

3 *Controle de temperatura da amostra*

Na estabilização e controle do valor da temperatura, foi utilizado o Controlador de Temperatura de modelo 350 da Newport. O aquecimento ou resfriamento da amostra é feito através de um dispositivo termoelétrico que funciona com base no efeito Peltier, que produz um gradiente de temperatura entre duas placas em função da direção e intensidade da corrente elétrica aplicada. O Controlador de Temperatura estabiliza a corrente necessária para equilibrar esse fluxo de calor de acordo com o valor da resistência de um termistor inserido em uma placa de alumínio que está em contato com a cubeta da amostra, como pode ser visto pelo esquema na Figura 3.1 que será detalhado logo adiante.

O valor da temperatura da amostra é escolhido pelo valor de resistência do termistor. É possível controlar a temperatura para valores entre -37 e 150 °C, limitada pelo termistor e controlador, mas o fluxo de calor depende da capacidade de perder ou receber calor na extremidade oposta do dispositivo termoelétrico que está ligado à cubeta, tal como visto na Figura 3.1. Uma placa de alumínio (AL), afixada à cubeta, é aquecida ou resfriada pelo dispositivo termoelétrico (TE) que produz um gradiente de temperatura entre as duas placas de acordo com o valor de realimentação obtido pelo termistor (TR). Um dissipador térmico troca calor com a água que circula no reservatório (R) através de duas mangueiras (M), as quais estão ligadas a uma bomba

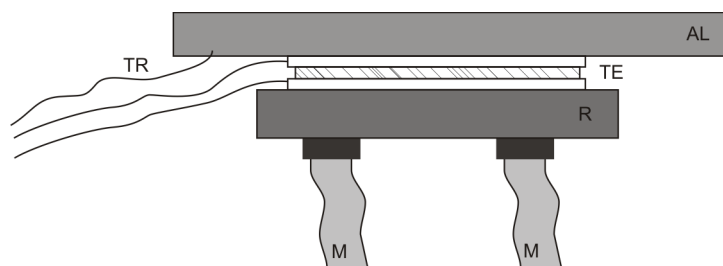


Figura 3.1: Esquema do controle de temperatura

d'água e um radiador.

Inicialmente, foi utilizado um dissipador térmico de microprocessador, mas a vibração do ventilador causava muito ruído nos sinais dos interferômetros. A bomba de água e o radiador, por serem conectados ao reservatório por mangueiras longas, ficam fora da mesa e longe o suficiente da bancada, de modo que não há interferência nos sinais.

Este modelo de controlador possui estabilidade de $0,005\text{ }^{\circ}\text{C}$ para períodos curtos, cerca de trinta minutos, e $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ para um turno de trabalho de cerca de um dia. As medições feitas foram em turnos de quatro horas no máximo, a fim de garantir a estabilidade térmica, estabilidade da intensidade do laser usado e evitar variação na concentração do líquido por perda de volume na evaporação. A estabilidade máxima do controlador é fortemente dependente do arranjo utilizado e do gradiente de temperatura entre as duas placas do dispositivo termoeletrico. Quanto mais calor quiser produzir, menor deverá ser a temperatura alcançada pelo dissipador na outra extremidade.

No arranjo experimental que trabalhamos, foi possível estabilizar a temperatura em valores entre $10\text{ e }45\text{ }^{\circ}\text{C}$. Valores mais altos causam evaporação rápida da amostra, além de dificultar a estabilização do controlador devido o gradiente de temperatura entre a amostra e o ar. A evaporação do líquido também provoca uma maior variação nas condições do ar.

A estabilização da temperatura do líquido pode ser visto no padrão da figura de difração do feixe que passa na amostra. Enquanto a temperatura está variando as franjas ficam distorcidas, e este efeito vai reduzindo até o equilíbrio térmico do sistema.

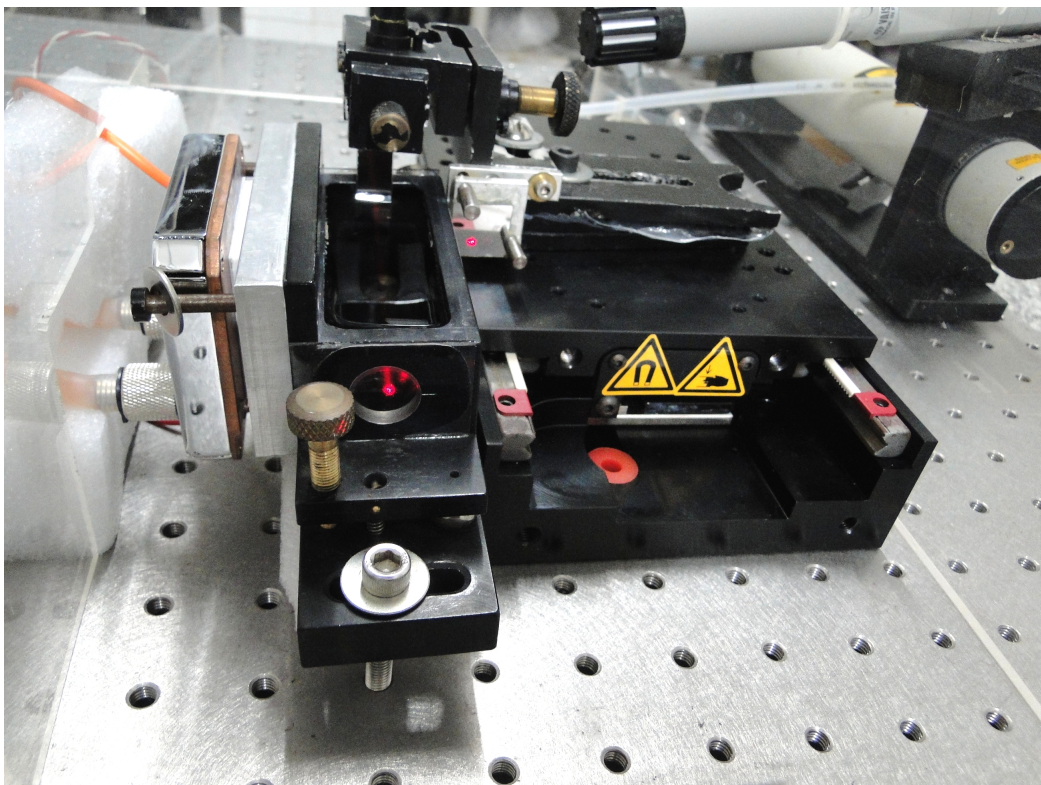


Figura 3.2: Foto em detalhe da cubeta com a água deionizada e o sistema de controle de temperatura.

4 Controle e medição automatizados

4.1 Controle e aquisição de dados

Neste experimento, vários procedimentos são efetuados separadamente para, em conjunto, chegar à medição desejada, e tal medição precisa ser feita várias vezes, a automação do experimento (ou de parte deste), quando possível, pode resultar na economia de horas ou dias de trabalho.

A automação é basicamente a implementação de mecanismos de controle e medição que são efetuados sem necessidade da ação humana durante o procedimento. Atualmente, muitos equipamentos de laboratório são providos de algum meio de comunicação acessível por computador. Deste modo, é possível montar um experimento onde vários equipamentos são operados simultaneamente, visando a redução de possíveis erros sistemáticos.

Enquanto os espelhos se movem dentro e fora da amostra, o deslocamento das franjas de interferência é captado por dois fotosensores. O sinal é amplificado e enviado ao computador por um conversor analógico/digital. A velocidade de deslocamento do espelho deve ser controlada em função da taxa de aquisição utilizada pelo conversor para que não haja perda da informação das franjas. É importante a aquisição iniciar apenas quando os espelhos já estão em movimento, para evitar captar o sinal de aceleração do motor de deslocamento.

No controle do refratômetro são utilizados equipamentos como o Ultra-Precision Linear Motor Stage, modelo XMS100 da Newport, que é uma base móvel linear com possibilidade de deslocamento até 10 cm, incremento mínimo de 1 μm no deslocamento e resolução de 0,001 μm . Este equipamento utiliza um controlador de velocidade externo operado, via placa de rede,

pelo computador.

Dois sensores óticos, obtidos de drives de CD, montados juntamente com um sistema de amplificação eletrônico, fazem a leitura das franjas de deslocamento dos dois interferômetros, transmitindo os dados para um DAq (Dispositivo de Aquisição de Dados), onde são convertidos para sinal digital e transmitidos para o computador.

As condições ambientais no local do experimento são obtidas a partir de uma estação climática da Vaisala, que mede umidade relativa, pressão atmosférica e temperatura. O sensor de temperatura e umidade, respectivamente, operam nas faixas de $-39,2$ a $+60$ °C, com precisão máxima de $\pm 0,2$ °C em $+20$ °C, e $0,8$ a 100% , com precisão de $\pm 1\%$. O sensor de pressão opera na faixa de 375 a 825 mmHg, com erro máximo de $\pm 0,2$ mmHg.

A aquisição de dados é feita com uso de um DAq da Newport (NI USB6008), que funciona como um conversor analógico-digital. A capacidade de aquisição é de 10000 pontos de 12 bits por segundo. Como são medidos sinais dos dois interferômetros, simultaneamente, a taxa máxima de aquisição usada é de 5000 pontos por segundo. Com esta taxa de leitura, foi escolhida a velocidade de $0,17$ milímetros por segundo na velocidade dos espelhos móveis. Deste modo é possível obter informação de cada franja com uma média de 10 pontos, como pode ser visto na Figura 4.1, onde está representado o programa usado para aquisição dos dados. O LabVIEW foi escolhido como ambiente de programação visual devido a facilidade de manipulação dos equipamentos, que já possuem os módulos prontos para acessá-los, assim como possibilita a computação paralela, o que demandaria um maior conhecimento de programação em outras linguagens. Com esta ferramenta, foi possível fazer aquisição dos sinais dos fotosensores simultaneamente.

4.2 Medição automatizada

Estando alinhados os espelhos, base móvel, amostra líquida na cubeta, laser estabilizado, controlador de temperatura (se usado) ativo, fotodetetores posicionados, toda bancada experimental pode, então, ser operada via programa de computador.

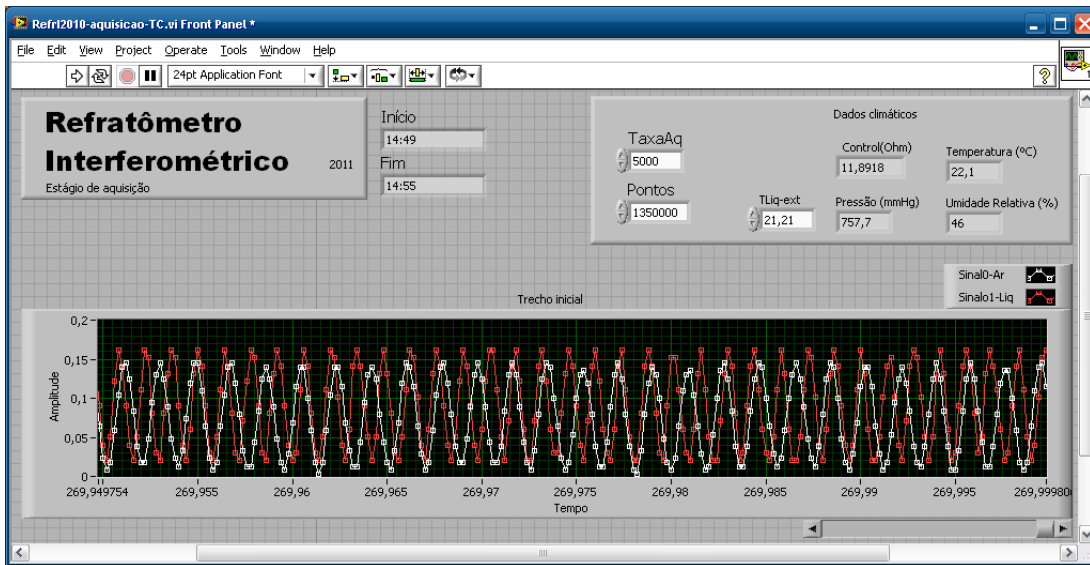


Figura 4.1: Interface do programa de aquisição.

Existem diversas soluções para esta parte do trabalho. Alguns laboratórios utilizam módulos de aquisição e controle com arquitetura livre, programáveis. Também é possível operar a base móvel pelo programa existente no controlador de velocidade e fazer a aquisição de dados por um osciloscópio digital.

Neste trabalho, utilizamos o ambiente LabVIEW para simular a bancada experimental. O programa trata como dispositivo virtual cada módulo do processo, que podem ser interconectados, similar a um circuito eletrônico. Uma cadeia de eventos foi programada com a seguinte sequência de eventos:

1. Início do deslocamento dos espelhos;
2. Aquisição dos dados climáticos e temperatura do líquido;
3. Aquisição dos dados dos fotodetetores;
4. Exibição dos dados salvos em disco.

Os dados coletados são salvos em arquivo tipo texto (ASCII), sendo um arquivo com duas colunas, com os dados dos fotodetetores, e outro arquivo com os dados climáticos e a temperatura do líquido. Os dados são, assim, armazenados para análise posterior.

5 *Processamento dos dados*

Um trecho dos pontos experimentais pode ser observado na Figura 5.1. A tentativa de ajuste dos pontos, por uma curva senoidal, mostrou que não há uma frequência fixa no sinal das franjas. Também foi observada a estabilidade do sinal enquanto os espelhos estão parados, portanto é esperado que a variação na fase do sinal seja devido a uma variação na velocidade de deslocamento dos espelhos, que será investigado futuramente. Para garantir a contagem das franjas corretamente, sem considerar a instabilidade na velocidade do espelho, o algoritmo deve contá-las individualmente.

Os arquivos com os dados das franjas, assim como os arquivos com os dados climáticos, são processados por um programa escrito na linguagem C.

Com um método simples pode-se ter uma precisão de $1/4$ de onda na contagem das franjas de interferência. A informação dos interferômetros é processada primeiro, na seguinte sequência:

1. Cada sinal é lido para um vetor
2. Em cada vetor é feita uma média móvel para reduzir possíveis ruídos
3. Cada sinal tem seu eixo deslocado para ficar simétrico ao eixo-x
4. É feita uma contagem de picos e vales com contribuição de $1/4$ numa soma para cada sinal
5. É feita uma contagem de cruzamentos no eixo-x com contribuição de $1/4$ numa soma para cada sinal

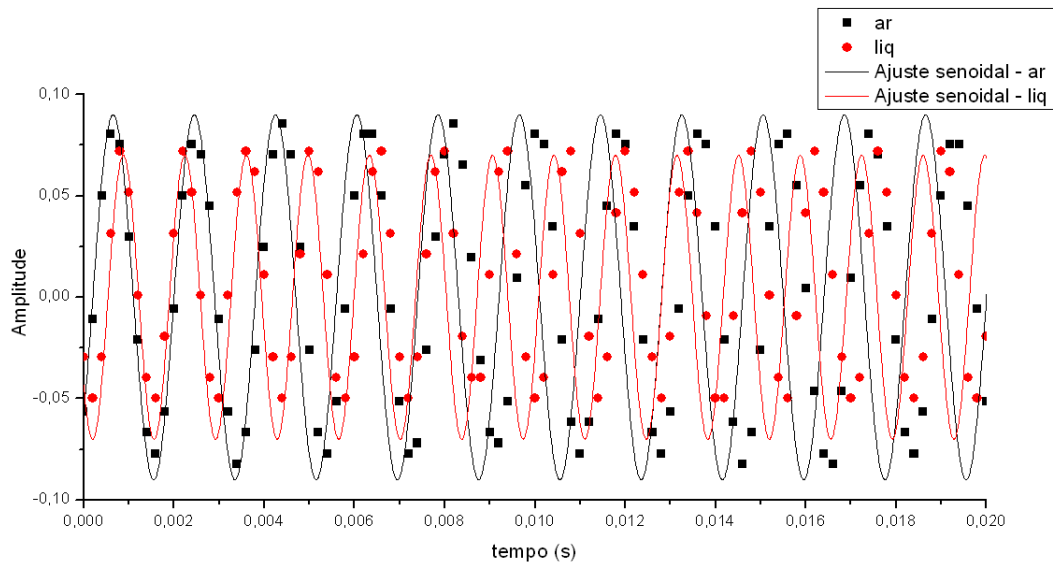


Figura 5.1: Pontos experimentais e tentativa de ajuste por curva senoidal

O resultado deste processo é o número das franjas do sinal 1, no ar (N_{ar}), e do sinal 2, no líquido (N_{liq}), que serão usados para o cálculo com a equação 1.5.

A média móvel, citada na lista anterior, é um tratamento simples de ruído que substitui os pontos do sinal para a média aritmética entre valores dos pontos imediatamente ao redor, ou seja, se p_i representa os pontos no sinal, com i variando de 1 até o número de pontos adquiridos, a média móvel substitui os pontos com a seguinte transformação (iniciando a iteração por $i = 2$):

$$p_i = (p_{i-1} + p_{i+1})/2 \quad (5.1)$$

Uma rotina de segurança que existe no programa mas, apenas não foi incluída na lista anterior, é a contagem separada dos picos e vales de cada sinal. É uma forma simples de verificar se existem ruídos provenientes da medição. A diferença entre os totais de picos e vales de cada sinal deve ser igual a zero ou um. Caso sejam contados mais picos que vales, com diferença maior que um, é provável que tenha ocorrido problemas na aquisição do sinal, e o conjunto de dados é descartado. Esta verificação é feita a cada medição para que, caso seja necessário repetir a medição, esta não seja feita com um intervalo de tempo muito grande entre as medidas, com propósito de reduzir qualquer variação nas condições climáticas e da amostra.

A partir do arquivo de dados climáticos, são lidos os valores da pressão, temperatura e

umidade relativa do ar no local da medida. Com a equação 1.5, obtém-se o índice de refração do líquido.

No Apêndice A consta o trecho do programa referente à contagem das franjas. Na saída do programa estão, em sequência, os seguintes valores:

- Índice de refração do ar
- Índice de refração do líquido
- Número de franjas do sinal 1 (ar)
- Número de franjas do sinal 2 (líquido)
- Pressão atmosférica
- Temperatura do ar
- Umidade relativa do ar
- Temperatura do líquido

6 *Fontes de erros*

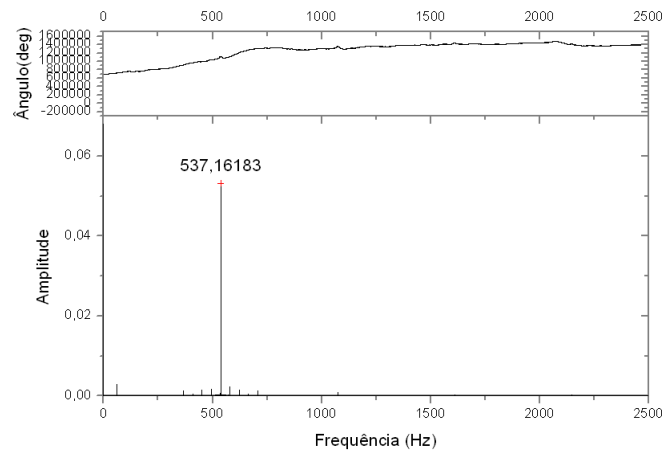
6.1 Alinhamento

Uma das fontes de erro do sistema é o alinhamento dos espelhos. Durante a medição, os espelhos móveis devem se deslocar paralelamente a direção de propagação dos feixes que refletem. No posicionamento do motor deve ser observado este alinhamento, e como resultado devemos ter os feixes retornando pelo mesmo caminho até o laser.

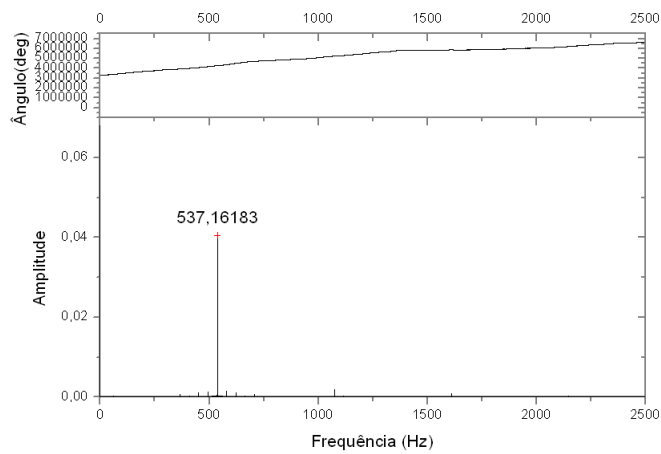
Durante o deslocamento, a direção de reflexão pode variar e modificar o padrão de interferência alterando, assim, a contagem das franjas. O alinhamento foi verificado medindo o padrão de interferência durante todo o percurso. O procedimento completo de medição, sem o uso da amostra líquida, deve resultar em valores iguais para a contagem de franjas do sinal de ambos os fotosensores.

Verificando o sinal dos sensores do refratômetro, é possível avaliar se há instabilidade nas condições climáticas, principalmente da temperatura, que possui a maior contribuição, além de determinar falha devido ao mal alinhamento dos espelhos. A transformada de Fourier do sinal de prova e referência, ambos passando pelo ar, pode ser visto na Figura 6.1. Devido a presença de uma única frequência mensurável, além não ter sido observada variação na intensidade do sinal durante a medição, pode-se dizer que não houve mudanças consideráveis no meio líquido, além de perturbação no padrão de interferência. Essa estabilidade também está associada à capacidade do controlador da base móvel manter a velocidade de deslocamento fixa.

Quando a medição é na água a sensibilidade é ainda mais notável. Posicionando o espelho no final da cubeta, maximizando o caminho ótico do feixe de prova dentro da amostra líquida,



(a) Sinal 1 - ar



(b) Sinal 2 - ar

Figura 6.1: Transformada de Fourier dos sinais ar-ar.

N_1	N_2	P (mmHg)	T (°C)	UR (%)	n_1	n_2
145034,25	145034,25	757,1	22,0	53	1,000268	1,000268
145033,50	145033,75	757,2	21,8	53	1,000269	1,000270
145033,25	145033,25	757,2	22,1	51	1,000268	1,000268
145034,25	145034,50	757,3	22,2	49	1,000268	1,000270
145033,25	145033,50	757,3	22,3	48	1,000268	1,000270
145033,25	145033,25	757,6	22,3	43	1,000268	1,000268
145033,25	145033,50	757,7	22,2	43	1,000269	1,000270
145033,25	145033,50	757,7	22,2	42	1,000269	1,000270
145033,25	145033,50	757,7	22,2	42	1,000269	1,000270
145033,00	145033,25	757,8	22,1	42	1,000269	1,000270

Tabela 6.1: Medição sem amostra. Laser de referência e de prova passando pelo ar. Índice de refração n_1 calculado pela equação de Edlén e n_2 obtido a partir da relação entre o número de franjas N_1 e N_2 .

é possível ver a distorção das franjas de interferência enquanto a temperatura do líquido ainda não alcançou o valor de equilíbrio, como visto na Figura 6.2. Nesta figura, a temperatura variou de forma livre, causando esta distorção exagerada devido à diferença de temperatura no volume percorrido pelo feixe de prova.

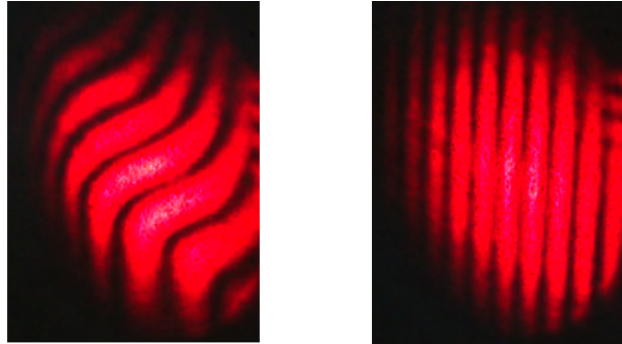


Figura 6.2: Franjas com temperatura do líquido instável (esquerda) e após passado o tempo de estabilização (direita).

O sinal dos sensores de prova e referência são observados durante a espera da estabilização térmica. Após ajustado o controlador de temperatura, o tempo esperado para o início da medição pode variar de dez minutos até uma hora, dependendo da diferença da temperatura inicial até a escolhida.

Durante a medição, o espelho varre a amostra por cerca de 4 minutos. O momento de iniciar a medição é escolhido quando não há variação maior que um quarto de franja por cerca de dez minutos, com o espelho parado. Um gráfico de parte deste monitoramento pode ser visto na Figura 6.3.

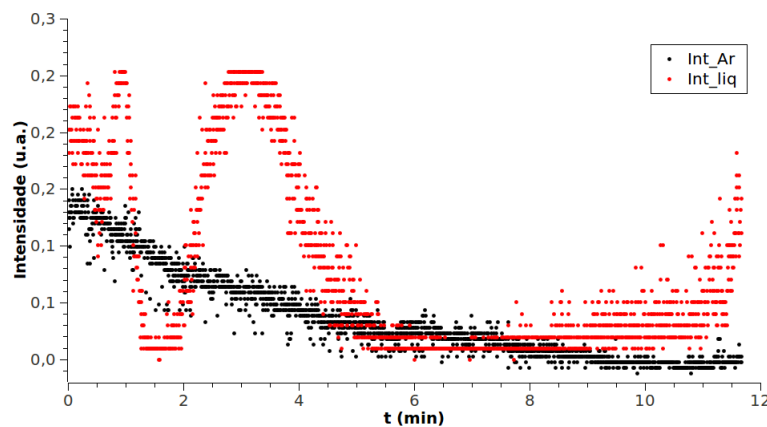


Figura 6.3: Estabilização da temperatura do líquido observada pelo deslocamento das franjas com o espelho parado.

6.2 Aberrações de interferência e a temperatura

A anomalia, observada na Figura 6.2, que ocorre no padrão de interferência durante a variação de temperatura no líquido, é observada devido ao volume de líquido que é percorrido pelo feixe de prova, como ilustrado na Figura 6.4, tanto no sentido vertical, que causa o entortamento das franjas, como no sentido horizontal, alargando e comprimindo as franjas.

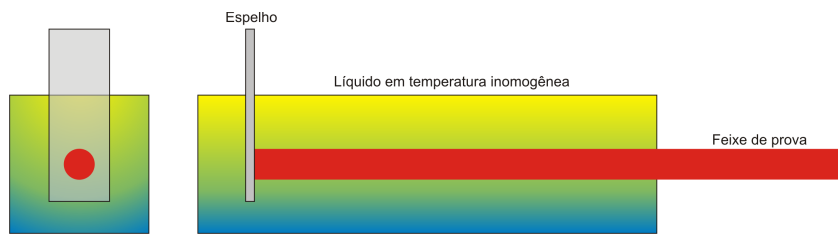


Figura 6.4: Feixe de laser varrendo volumetricamente a amostra líquida.

É possível fazer uma estimativa da diferença de temperatura que resultou na distorção da Figura 6.2. Pelos resultados experimentais, a variação do índice de refração com a temperatura é da ordem de 10^{-4} . Usando, como referência, a Figura 6.5, nota-se um deslocamento de três franjas para a direita, a partir da franja central. Usando os dados seguintes, que foram obtidos neste trabalho:

$$N_{liq} = 193175,5$$

$$N_{ar} = 145052,0$$

Simulando a diferença de três franjas, a mais, no sinal do feixe de prova, o valor das franjas para o líquido passa para 193178,5. Como o valor do índice de refração do líquido é proporcional à razão entre estas duas contagens, então a diferença resultante da variação do índice de refração do líquido será:

$$\Delta n \approx \frac{N_{liq}}{N_{ar}} - \frac{N'_{liq}}{N_{ar}} = -2 \times 10^{-5}$$

Portanto, relacionando a variação do índice de refração em relação à temperatura com a

derivada, tem-se a seguinte aproximação:

$$\begin{aligned} \frac{dn}{dT} &\approx -1 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \\ \frac{\Delta n}{\Delta T} &\rightarrow \frac{dn}{dT} \\ \Delta T &= \frac{\Delta n}{(dn/dt)} \approx \frac{-2 \times 10^{-5}}{-1 \times 10^{-4}} = 0,2 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

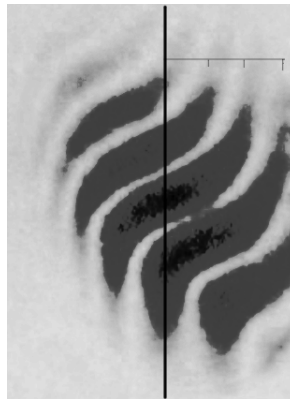


Figura 6.5: Realce no deslocamento de 3 franjas devido à diferença de temperatura no volume monitorado pelo feixe de prova.

Para deixar mais claro, imaginando uma onda percorrendo um meio com dois índices de refração diferentes, a diferença no caminho óptico percorrido por cada parte da onda irá resultar numa diferença de fase na onda que percorre em cada caminho. No caso do líquido com a variação de temperatura. Até que o equilíbrio seja alcançado, haverá regiões com diferentes temperaturas movimentando-se por todo o volume, percebido, assim, pelo feixe de prova.

6.3 Alinhamento e efeito Moiré

Fazendo analogia com o padrão Moiré, pode-se compreender o comportamento das franjas de interferência e relacioná-las ao grau de alinhamento dos feixes do interferômetro.

Denotando o modelo de ondas planas como barras paralelas consecutivas, na Figura 6.6, perceba dois quadrados formados por barras, onde cada quadrado simboliza um feixe do laser, propagando-se no sentido horizontal, e a interseção destes o padrão de interferência resultante. Nos dois conjuntos, as barras são de mesma espessura e igualmente espaçadas com distância

igual à espessura, denotando ondas de mesma frequência, além de estarem alinhadas, como feixes propagando-se na mesma direção e sentido. A figura de interferência, esperada, deveria estar entre dois extremos, representados pela Figura 6.6(a), totalmente escura, onde a interferência entre as ondas é destrutiva, e a Figura 6.6(b), totalmente claro, ou máximo de intensidade, representando a interferência construtiva.

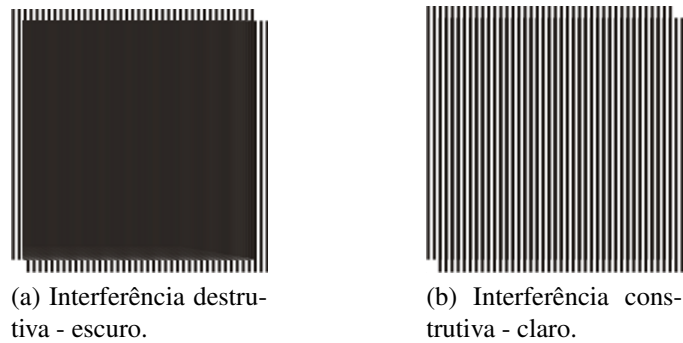


Figura 6.6: Padrão esperado da figura de interferência.

Durante o experimento, o que obtemos são franjas no padrão de interferência. Isto pode ser compreendido analisando os padrões de interferência, na Figura 6.7. Como tratamos de ondas planas, denotaremos a direção de propagação dos feixes pela direção de propagação das barras.

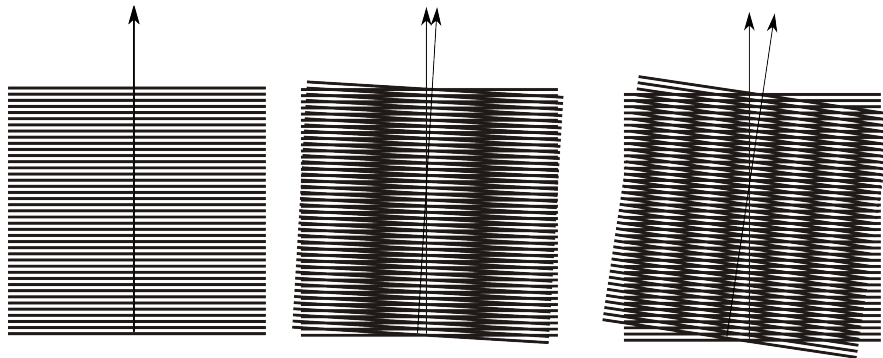


Figura 6.7: Figuras do padrão Moiré demonstrando nível de alinhamento do interferômetro através do grau de inclinação relativa entre as grades.

Na Figura 6.8, δ é a distância entre as franjas, os máximos de interferência, λ é o comprimento de onda, simbolizado pelo espaço entre as barras paralelas. A inclinação entre os feixes é α . Analisando a figura, pode-se obter as seguintes relações, para o triângulo maior:

$$\delta = d \cos \frac{\alpha}{2} \quad (6.1)$$

Para o triângulo menor:

$$\frac{\lambda}{2} = d \sin \frac{\alpha}{2} \cos \frac{\alpha}{2}$$

portanto:

$$\frac{\lambda}{d} = \sin \frac{\alpha}{2} \cos \frac{\alpha}{2} = \sin \alpha \quad (6.2)$$

Com as equações 6.1 e 6.2, obtém-se uma relação entre a distância entre as franjas e o ângulo de desvio entre os feixes, dadas por:

$$\begin{aligned} \delta &= \frac{\lambda}{\sin \alpha} \cos \frac{\alpha}{2} \approx \frac{\lambda}{\sin \alpha} \\ \sin \alpha &= \frac{\lambda}{\delta} \\ \alpha &\approx \frac{\lambda}{\delta} \end{aligned} \quad (6.3)$$

As aproximações utilizadas levaram em consideração pequenos ângulos, de modo que $\cos \alpha \approx 1$ e $\sin \alpha \approx \alpha$.

A situação real, é que sempre haverá desalinhamento dos feixes, quanto maior o grau de inclinação relativa entre os feixes menor o espaçamento das franjas de interferência. Assim, para reduzir o erro das medições no refratômetro interferométrico, pode-se avaliar o alinhamento utilizando esta analogia, ajustando os espelhos até observar um padrão de franjas com a maior largura possível.

Para aquisição dos dados, é necessário ampliar o padrão de interferência com auxílio de uma lente convergente. A Figura 6.9 mostra esta ampliação do padrão de interferência, e a relação entre as distâncias entre máximos de interferência no plano onde se localiza o fotodetector e a do padrão antes de ser ampliado.

Sendo $\Delta = 12$ mm a distância entre as franjas no plano do fotodetector, δ a distância entre as franjas no feixe antes de atravessar a lente, $f = 3$ cm a distância focal e $D = 60$ cm a distância

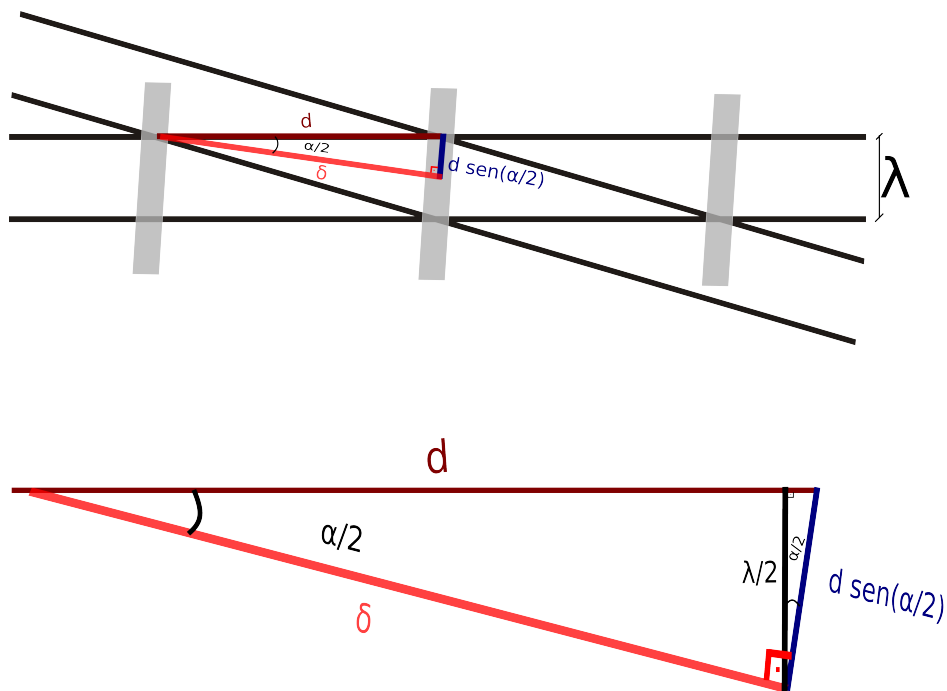


Figura 6.8: Relações entre as distâncias das franjas do padrão de interferência e o comprimento de onda do feixe de laser.

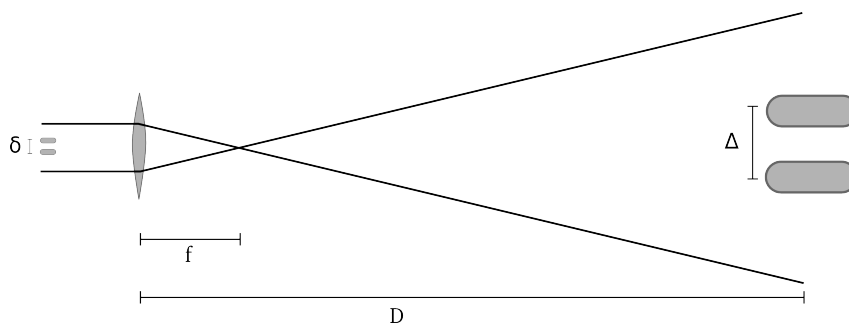


Figura 6.9: Relação entre as distâncias entre franjas na figura de interferência ampliada, pela lente, e a figura real.

entre a lente e o fotodetector. Fazendo uma relação geométrica, tem-se que o fator de ampliação da figura de interferência pode ser dado por:

$$M = \left(\frac{D-f}{f} \right) = 19 \quad (6.4)$$

Assim, a distância entre as franjas antes da lente é:

$$\delta = \frac{\Delta}{M} \approx 0,6 \text{ mm} \quad (6.5)$$

E usando o resultado da equação 6.3, pode-se fazer uma estimativa de um desvio nos feixes de $\alpha \approx 1$ miliradianos.

6.4 Desvio angular

Desvios no alinhamento dos espelhos podem reduzir a precisão nas medidas. Com um alinhamento ideal, o feixe deveria percorrer o mesmo caminho ao ser refletido pelos espelhos, no interferômetro. A situação real é ilustrada na Figura 6.10, o que acontece é que um pequeno desvio no ângulo de incidência do feixe, ao penetrar a cubeta, resulta no aumento do caminho óptico, de modo que o valor calculado pela equação 1.5 não estará correto. A equação do índice de refração do líquido considera um alinhamento perfeito nos espelhos dos interferômetros.

Para se aproximar da situação ideal, onde o ângulo de incidência do feixe é zero, relativo a um vetor normal ao plano do espelho, deve-se obter o retorno do feixe do interferômetro até a fonte de luz. Na prática, não podemos reincidir o feixe dentro da cavidade, pois resulta na perturbação do sistema de estabilização do feixe.

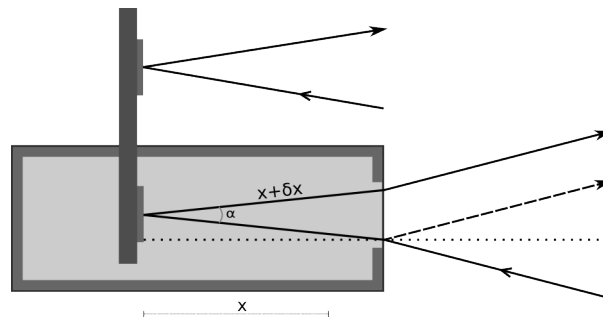


Figura 6.10: Representação da alteração do caminho óptico dos feixes devido a imperfeição no alinhamento dos espelhos.

Sendo α o ângulo formado pela reflexão do feixe no interferômetro de prova, então o caminho óptico, idealmente tomado como $2x$, é tado por:

$$\begin{aligned} x &= (x + \delta x) \cos \frac{\alpha}{2} \\ \delta x &= \frac{x}{\cos \alpha/2} - x \end{aligned} \quad (6.6)$$

O deslocamento da base controlada é $x = 45$ mm, e o desvio do ângulo, obtido pelo padrão de franjas na sessão anterior, é $\alpha = 1$ mrad. Obtendo, com a equação 6.6, um desvio no caminho ótico de $\delta x = 5,6 \times 10^{-9}$ m.

Usando a equação do caminho ótico, podemos aproximar o erro na contagem das franjas da seguinte forma:

$$\begin{aligned} N &= \frac{\lambda}{2nx} \\ \delta N &= \frac{2n}{\lambda} \delta x \end{aligned} \quad (6.7)$$

Com $n \approx 1,33$, $\lambda = 632,8 \times 10^{-9}$ m para o laser utilizado, e o desvio no caminho ótico obtido com a equação 6.6, resulta em um desvio na contagem de franjas de $\delta N \approx 0,02$ franjas. Para uma contagem de franjas da ordem de 10^5 , o desvio no valor do índice de refração é da ordem de 10^{-7} , garantindo a precisão das medidas obtidas neste trabalho.

$$\delta n = \frac{1 \times 10^5 + 0,04}{1 \times 10^5} - 1 = 4 \times 10^{-7} \quad (6.8)$$

6.5 Contagem de franjas

Na Figura 6.11 é possível observar o aumento da precisão com o número de franjas obtidos no experimento. Os valores foram calculados a partir de uma mesma aquisição, fazendo várias análises com diferentes quantidades de pontos.

Fazendo a análise da expectativa de erro para equação 1.5 ($n_{liq} = n_{ar}(N_{liq}/N_{ar})$), é possível avaliar a precisão em função da contagem de franjas utilizando a equação do erro 6.9 [18].

$$\delta_{n_{liq}} = n_{liq} \sqrt{\left(\frac{\delta N_{liq}}{N_{liq}}\right)^2 + \left(\frac{\delta N_{ar}}{N_{ar}}\right)^2} \quad (6.9)$$

Com uma contagem da ordem de 10^4 franjas, se o erro na contagem for de uma franja, utilizando a equação 6.9, temos $\delta_{n_{liq}} \approx 10^{-4}$. Aumentando a contagem para 10^5 franjas, a

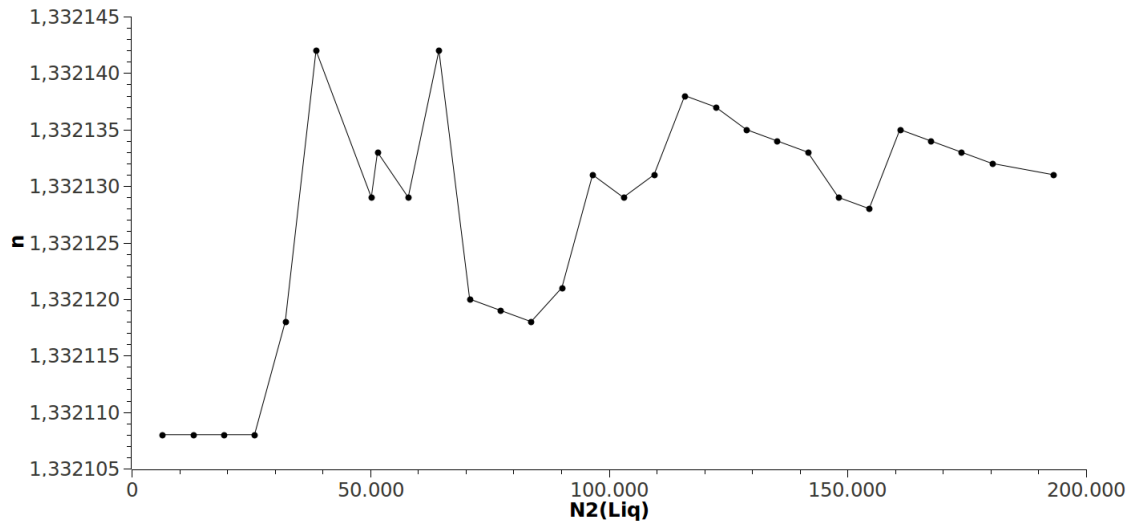


Figura 6.11: Resultado do índice de refração em função do número de franjas.

variação de uma franja resultará em $\delta_{n_{liq}} \approx 10^{-5}$. Esta é a ordem de grandeza da contagem de franjas obtida no nosso experimento. O deslocamento relativo a este resultado é de quase 5cm . Para alcançar mais uma ordem de grandeza na precisão, deveríamos aumentar o valor do número de franjas, e para tal aumentar o deslocamento, conseqüentemente o volume da amostra analisada. A solução adotada para melhorar a precisão sem recorrer à modificação no deslocamento, foi garantir maior precisão na contagem de franjas. Como o algoritmo utilizado na contagem consegue avaliar até $1/4$ de franja, o resultado do erro estimado alcança o valor da ordem de 10^{-6} .

7 *Índice de refração de líquidos*

Com a montagem experimental que estamos utilizando é possível medir o índice de refração de soluções líquidas transparentes que não tenham rápida evaporação. Inicialmente as medições serão feitas utilizando água deionizada.

Para utilizar a equação de Edlén é necessário que não possuam outros elementos no ar, além dos normalmente encontrados nas quantidades habituais. Em caso de rápida evaporação do líquido analisado, o índice de refração do ar pode variar continuamente durante a medição, perdendo a precisão da equação. Para, por exemplo, soluções alcólicas seria necessário outro tipo de cubeta que isolasse a amostra do ar no entorno do refratômetro, de outro modo invalidaria o cálculo do índice de refração do ar.

7.1 **A água deionizada**

O processo de deionização é a retirada de íons através da passagem da água por filtros especiais de resina, e tratamento com soluções para neutralização dos íons negativos ou positivos presentes no líquido, como outras impurezas como: sódio, ferro, cobre e cálcio. A água deionizada também pode ser encontrada pelo nome de água desmineralizada.

Existem aplicações industriais e domésticas para este tipo de água. Uma aplicação simples é para completar a solução ácida de bateria automotiva, pois a água de torneira pode reduzir sua vida útil. Além de ser boa como sistema de refrigeração e melhora no efeito anticorrosivo para soluções com anticongelante.

As aplicações de água deionizada e água destilada são bem parecidas, embora sejam pro-

Medida	N_{ar}	N_{liq}	P	T_{ar}	UR	n_{ar}	n_{liq}	T_{liq}
1	145052,00	193175,50	758,0	20,6	39	1,000270	1,332127	19,58
2	145051,25	193175,25	758,0	20,6	39	1,000270	1,332132	19,56
3	145052,00	193175,50	758,0	20,7	38	1,000270	1,332127	19,57
4	145051,00	193175,50	758,0	20,7	38	1,000270	1,332136	19,55
5	145051,00	193175,25	758,0	20,7	38	1,000270	1,332134	19,57
6	145051,00	193175,25	758,0	20,7	37	1,000270	1,332134	19,56
7	145051,25	193176,00	758,1	20,7	37	1,000270	1,332137	19,57
8	145051,25	193176,00	758,1	20,7	37	1,000270	1,332137	19,56
9	145051,25	193173,50	758,3	20,7	37	1,000270	1,332120	19,81
10	145051,00	193173,25	758,3	20,7	37	1,000270	1,332121	19,79
11	145051,00	193172,50	758,3	20,7	36	1,000270	1,332116	19,79
12	145051,25	193173,50	758,3	20,7	40	1,000270	1,332120	19,70
13	145051,25	193173,00	758,4	20,7	38	1,000270	1,332117	19,77
14	145051,50	193173,25	758,5	20,7	37	1,000270	1,332116	19,77
15	145051,25	193173,00	758,5	20,7	36	1,000270	1,332117	19,80
16	145051,00	193173,00	758,5	20,6	36	1,000270	1,332119	19,79

Tabela 7.1: Água deionizada. N - número de franjas, P - pressão barométrica do ar (mmHg), T - temperatura ($^{\circ}\text{C}$), UR - umidade relativa do ar (%), n - índice de refração para luz de comprimento de onda de 638,2 nm

duto diferentes. Há mais trabalhos com água destilada na bibliografia e, algumas usam as duas sem avaliar muita distinção nos resultados. Ambas são consideradas águas puras.

7.1.1 Índice de refração da água deionizada

Foram feitas medidas com água deionizada em temperatura próxima à temperatura ambiente. A temperatura do líquido foi verificada com um termômetro de imersão com resolução de duas casas decimais e erro máximo de $0,1^{\circ}\text{C}$.

Como teste inicial, foram feitas oito medições para dois valores fixos de temperatura. Os dados das medições podem ser vistos na Tabela 7.1.

Avaliando os resultados da Tabela 7.1, para cada valor fixo de temperatura, é possível obter os resultados que podem ser vistos na Tabela 7.2.

O tempo para estabilização da temperatura foi de cerca de uma hora para início das medidas, e 10 minutos para estabilização da temperatura seguinte. Durante a medição, foi observada uma variação na temperatura do líquido de, no máximo, $0,02^{\circ}\text{C}$.

Média do índice de refração = 1,332133	Média do índice de refração = 1,332118
Desvio padrão = $4,2 \times 10^{-6}$	Desvio padrão = $2,0 \times 10^{-6}$
Desvio padrão da média = $1,5 \times 10^{-6}$	Desvio padrão da média = $7,2 \times 10^{-7}$
Média da temperatura = 19,565	Média da temperatura = 19,778
Desvio padrão = $9,3 \times 10^{-3}$	Desvio padrão = $3,4 \times 10^{-2}$
Desvio padrão da média = $3,3 \times 10^{-3}$	Desvio padrão da média = $1,2 \times 10^{-2}$

Tabela 7.2: Resultado da análise estatística dos dados da Tabela 7.1.

A mesma ordem de grandeza para o erro foi mantida mesmo com ciclos de três medições para cada valor ajustado no controlador de temperatura.

7.1.2 Análise termo-ótica da água com formação de lente térmica

A técnica de lente térmica (LT) é um método de investigação das propriedades de materiais com dependência na temperatura [21]. Dentre as características avaliadas está a difusividade térmica.

Um arranjo possui dois feixes de laser, de comprimentos de onda diferentes, onde um é utilizado para excitação e outro como feixe de prova. O perfil gaussiano do feixe de excitação provoca uma variação na temperatura da amostra, de modo que o índice de refração varia de acordo com o perfil do feixe, dando origem a um elemento tipo lente.

Estudos foram realizados com amostras de água deionizada e destilada [16]. O sinal da LT é obtido pelo feixe de prova após ligado o feixe de excitação e é similar a uma queda exponencial de um valor máximo para um mínimo de intensidade no sinal do feixe de prova. Foram feitas medições com a água estabilizando em temperaturas entre 22 e 70 °C, de modo que a dependência do parâmetro θ com a temperatura pôde ser observada. A equação teórica 7.1 é utilizada para o ajuste do sinal transiente da lente térmica.

$$I(t) = I(0) \left(1 - \frac{\theta}{2} \tan^{-1} \left\{ \frac{2mV}{[(1+2m)^2 + V^2](t_c/2t) + 1 + 2m + V^2} \right\} \right)^2 \quad (7.1)$$

na qual

$$\theta = -\frac{P_e A_e I_0}{K \lambda_p} \left(\frac{dn}{dT} \right)_p ; V = \frac{Z_1}{Z_c} ; m = \left(\frac{\omega_p}{\omega_e} \right)^2 \quad (7.2)$$

Nos dados do artigo sobre lente térmica, θ é o deslocamento de fase, induzido pela temperatura, do feixe de prova após atravessar a amostra. O ajuste do sinal de LT é feito por meio da equação 7.2, na qual P_e é a potência do feixe de excitação, A_e o coeficiente de absorção no comprimento de onda do feixe de excitação, I_0 a intensidade do sinal, captada pelo fotodetector, do centro do feixe de prova, K a condutividade térmica, λ_p o comprimento de onda do feixe de prova, Z_1 a distância da cintura do feixe de prova até a amostra, Z_c a distância confocal do feixe de prova, ω_p o valor da cintura do feixe de prova no local a amostra e ω_e a cintura mínima do feixe de excitação.

No artigo de Pedreira é apresentado um gráfico da dependência térmica de θ/P , onde é possível observar anomalias nas temperaturas 39, 42 e 59 °C. Outros trabalhos, também encontraram anomalias em curvas com dependência na temperatura.

Em artigo sobre propriedades termodinâmicas de misturas binárias aquosas [23], e também da água pura, os dados são analisados a partir do desvio dos valores experimentais em relação à uma curva teórica usada no ajuste. É observada uma histerese quando as medições são feitas na faixa de temperatura entre 0 e 100 °C, em ciclos de duração menor que 7000 segundos. Quando estas curvas de desvio são avaliadas a partir do ajuste feito com a equação de Lonrentz-Lorenz, as maiores variações ocorrem próximas às temperaturas de 17, 35 e 82 °C. A equação modificada de Lonrentz-Lorenz, usada no artigo de Zheng, relaciona o índice de refração (n) com a temperatura (T), densidade (ρ), peso molecular do sistema (W) e índice de refração molar (A), como visto na equação 7.3.

$$n(T) = \frac{1+2A(T)\rho(T)}{\sqrt{\frac{1-A(T)\rho(T)}{W}}} \quad (7.3)$$

Deste modo, as anomalias sugerem mudanças no arranjo molecular ou nas ligações moleculares da água, dado que a temperatura afeta as ligações de hidrogênio da solução.

Zheng cita que as anomalias observadas já seriam esperadas para a água em temperaturas próximas a 4 °C, onde a densidade possui um máximo, 30 °C, que apresenta um valor mínimo no calor específico, 50 °C, cujo módulo de Bulk possui um mínimo e na região entre 75 e 80

°C, onde a velocidade do som apresenta um máximo.

Embora seja possível observar anomalias na derivada do índice de refração com a temperatura, nos nossos dados, nenhuma histerese foi observada devido ao método experimental utilizado. Nos trabalhos de Zheng, a célula fica isolada enquanto as medições são realizadas. No Refratômetro Interferométrico do L.I.O., o espelho que se movimenta dentro da água perturba o sistema, impossibilitando a permanência de qualquer arranjo molecular preferencial relacionado à temperatura.

7.1.3 Análise interferométrica da água deionizada

Devido à estabilidade do sistema, para avaliação da dependência do índice de refração com a temperatura, foram feitas três medidas para cada valor ajustado no controlador de temperatura, variando cerca de 0,2 °C entre cada sequência de medições. Para a medição de cada sequência foi verificada a estabilidade pelo sinal obtido dos feixes de referência e de prova, sendo a medição efetuada após o deslocamento da franja ser menor que um quarto, com os espelhos da base móvel, parados, posicionados no final da cubeta, garantindo máximo caminho ótico pelo líquido, durante um intervalo de dez minutos.

Os dados obtidos neste experimento estão dispostos nas Tabelas B.1 e B.2, contidos no Apêndice B, onde os valores do índice de refração e temperatura são a média aritmética entre as três medições e o erro é o valor do desvio padrão da média.

O gráfico com os dados do experimento pode ser visto na Figura 7.1, assim como os dados do ajuste com função polinomial de terceiro grau. A escolha do polinômio de terceiro grau foi devido ao menor erro no ajuste da curva, em comparação com outros polinômios próximos. O resultado é bastante próximo ao obtido por Hawkes [8] nesta faixa de temperatura. Na tabela com os dados experimentais é possível ver o valor do erro calculado para cada conjunto de medidas. Na Figura 7.2, uma ampliação do gráfico para evidenciar as barras de erro.

O ajuste polinomial de terceira ordem, possui os coeficientes $a_0 = 1,33315$, $a_1 = -1,2 \times 10^{-5}$, $a_2 = -2,2 \times 10^{-6}$ e $a_3 = 9,5 \times 10^{-9}$, com taxa de variação da ordem de 10^{-4} .

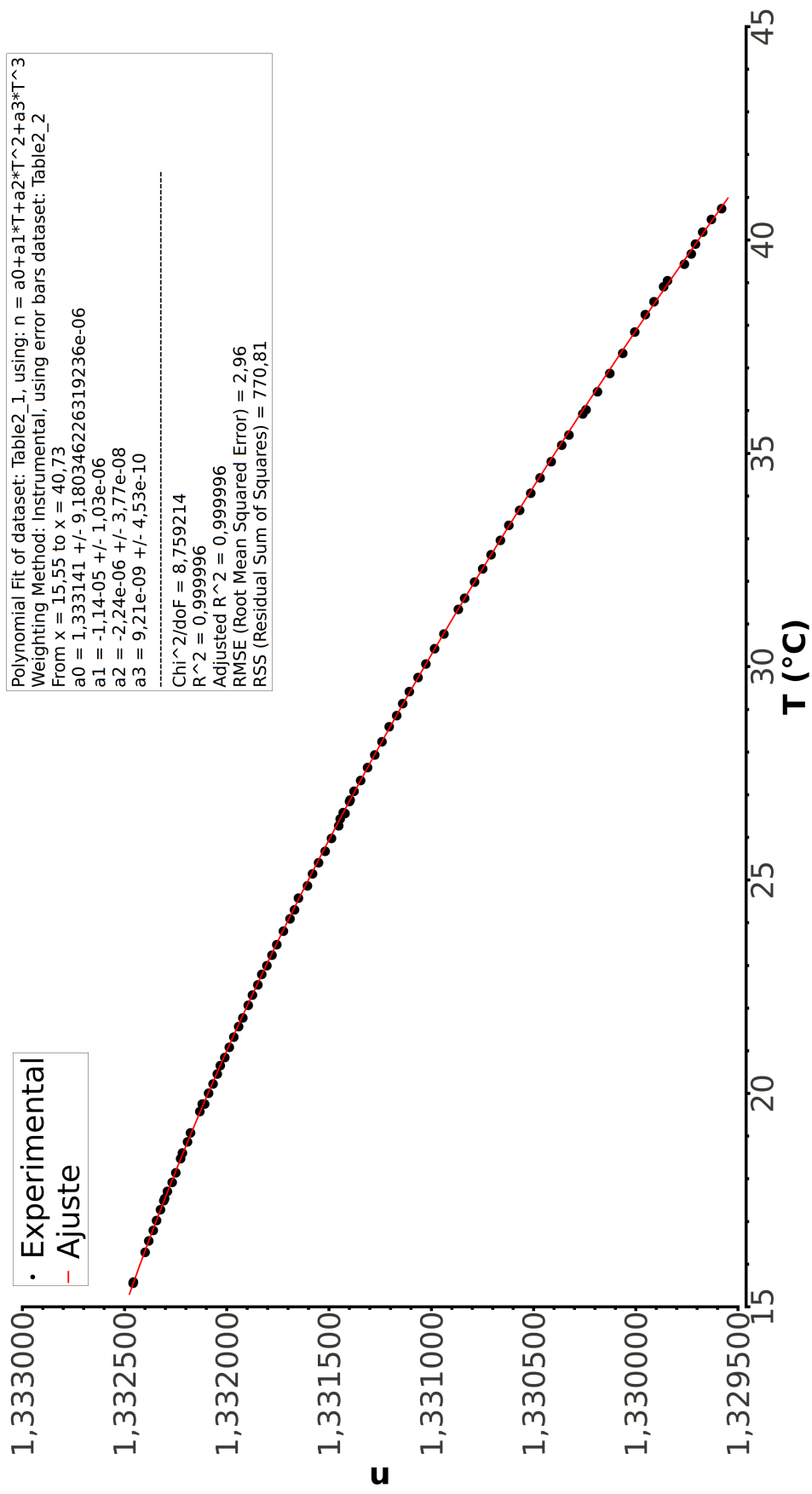


Figura 7.1: Água deionizada - Dependência do índice de refração com a temperatura no intervalo entre 15,55 °C a 40,73 °C.

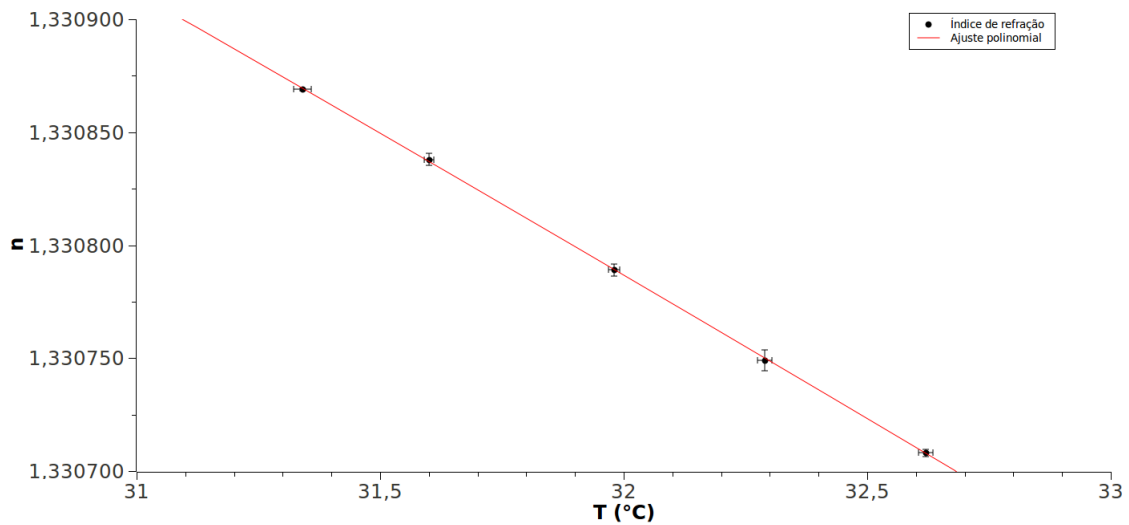


Figura 7.2: Trecho do gráfico da dependência do índice de refração com a temperatura.

É possível pequenas perturbações nos valores próximos as temperatura de 39 °C. Em um estudo feito com água pura [16], utilizando a técnica de lente térmica, foram observadas anomalias na curva do índice de refração nas temperaturas de 39, 42 e 59 °C. Com os resultados obtidos a partir do interferômetro, dando ênfase ao intervalo próximo ao avaliado por Pedreira, foi possível obter resultados similares aos obtidos com a técnica da lente térmica. O gráfico do índice de refração, obtido pelo refratômetro interferométrico, para as temperaturas entre 36 e 41 °C, pode ser visto na Figura 7.3, a derivada do índice de refração com a temperatura dos dados experimentais pode ser vista na Figura 7.4. Os resultados obtidos no L.I.O. são semelhantes aos dados obtidos por Pedreira, na dependência térmica do θ , cuja derivada é função da derivada segunda do índice de refração com a temperatura, como visto na equação 7.2.

A derivada negativa dos dados experimentais obtidos com o Refratômetro Interferométrico, visto na Figura 7.4, apresenta um salto no valor médio da derivada na região onde as anomalias foram observadas.

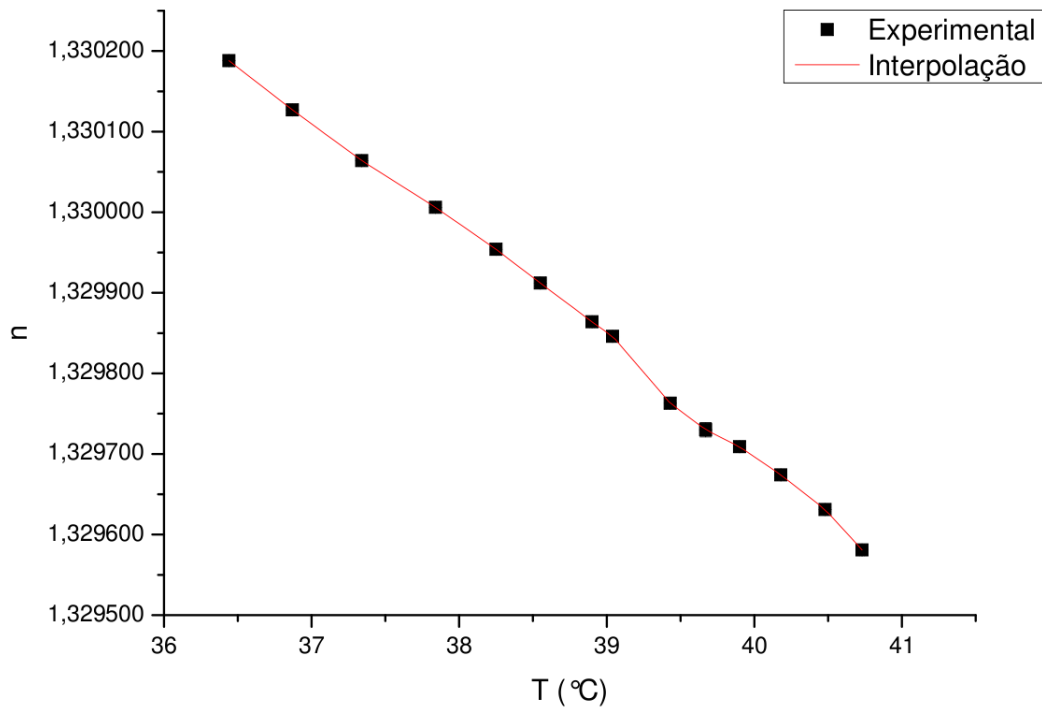


Figura 7.3: Água deionizada - Dependência do índice de refração com a temperatura no trecho com anomalia.

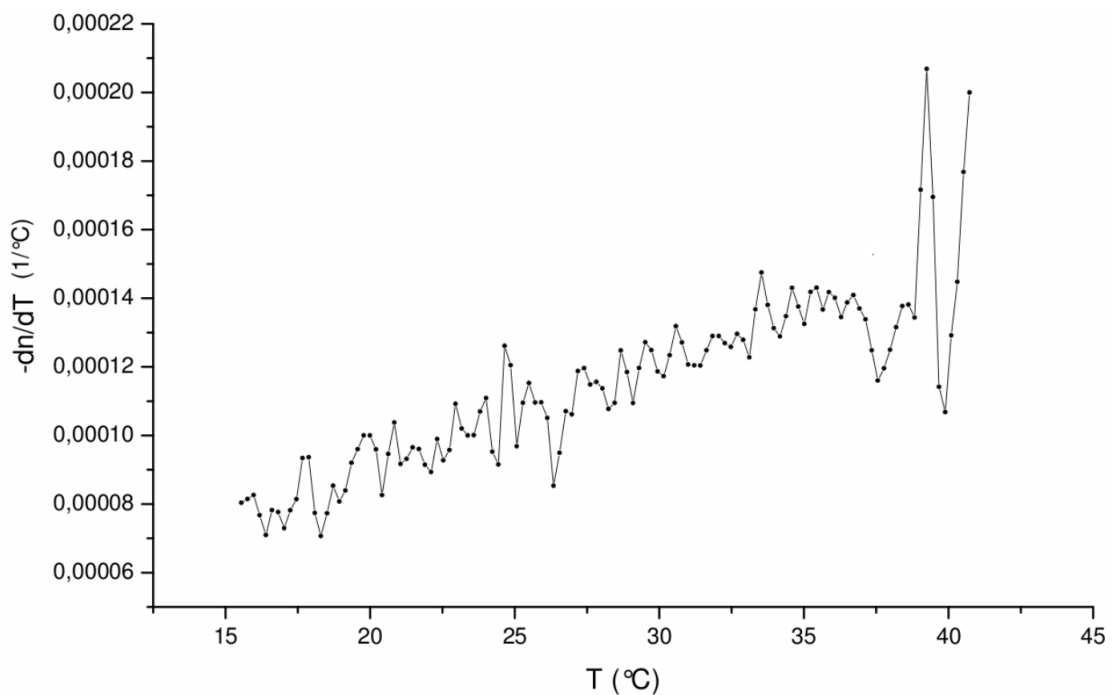


Figura 7.4: Água deionizada - Derivada negativa do índice de refração com a temperatura, obtido dos pontos da interpolação do conjunto completo dos dados.

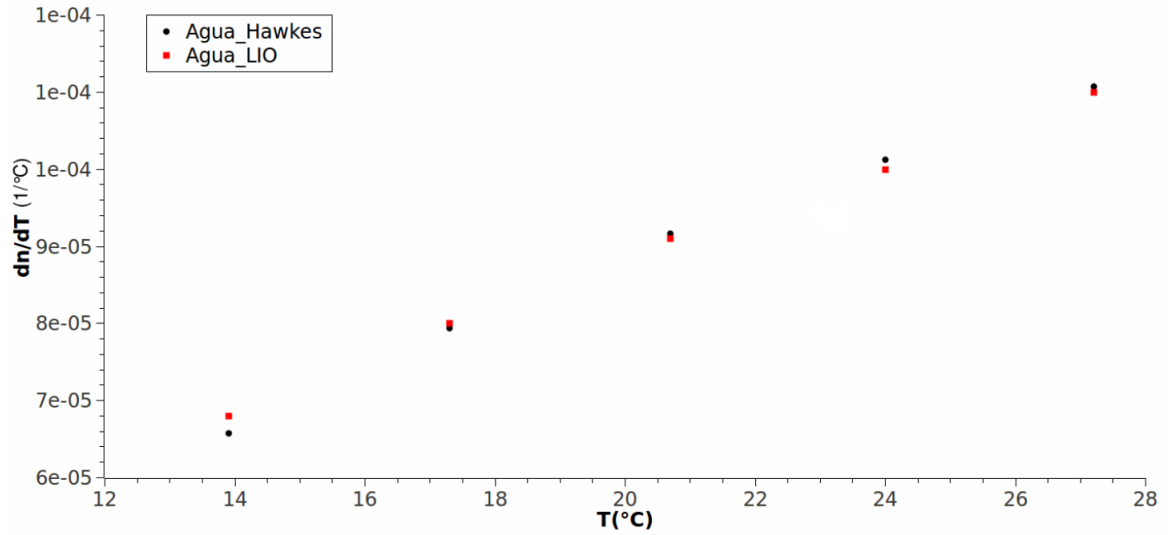


Figura 7.5: Água deionizada - Comparação com os resultados de Hawkes para a taxa de variação do índice de refração com a temperatura.

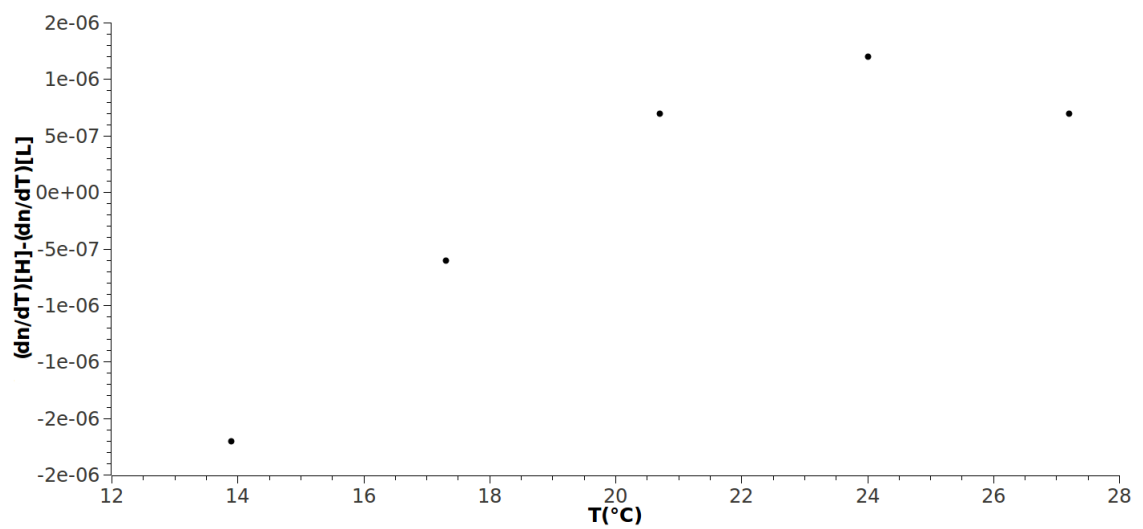


Figura 7.6: Água deionizada - Diferença entre os resultados obtidos por Hawkes e o nosso.

Conclusão

A nossa montagem do refratômetro interferométrico mostrou-se eficiente na medição precisa do índice de refração da água deionizada, assim como sua dependência térmica dentro da faixa de 15 a 42°C. Com a precisão na sexta casa decimal, foi possível observar anomalias no índice de refração perto do limite máximo de temperatura alcançado, demandando um estudo mais aprofundado deste comportamento.

Nenhuma histerese foi encontrada nos dados experimentais, comparando com outros trabalhos, e nem era esperado devido a perturbação do sistema dada a existência do espelho que se desloca dentro da amostra.

O erro estatístico da ordem de 10^{-6} foi devido à quantidade de franjas lidas e a precisão de 1/4 do programa de contagem. Utilizando os equipamentos já de posse do Laboratório de Instrumentação Ótica, o aumento na quantidade de pontos por franjas resulta em um aumento no tempo de medição, devido a baixa taxa de aquisição do conversor analógico-digital, relativo a este tipo de medição.

Comparações com técnicas que não usam feixe de referência, associada à precisão no deslocamento da base móvel que foi utilizada, possibilitaram uma análise preliminar no cálculo do índice de refração a partir do caminho ótico e o número de franjas, no entanto é necessário aumentar a quantidade de pontos por franja para melhorar o resultado por este método de abertagem.

Um aumento no tempo de medição pode ocasionar em perda da precisão no cálculo do índice de refração do ar, pela equação de Edlén 2.8, devido a variação nas condições climáticas. A estabilidade obtida pelo uso da caixa acrílica foi suficiente para garantir a precisão durante as medições.

Outras técnicas de refratometria de alta precisão, utilizadas atualmente, alcançam precisão em torno de 10^{-5} e 10^{-6} . Medições com refratômetros eletrônicos, baseados no de Abbe, podem alcançar precisão até 10^{-5} [14]. Estudos na variação do índice de refração em soluções químicas também são obtidas por refratômetros que utilizam fibra ótica [11, 17].

Perspectivas

Estudo mais preciso do intervalo de temperatura com anomalia na curva do índice de refração.

Aumento da faixa de temperatura no controle térmico da amostra.

Melhorar o isolamento térmico da cubeta.

Instalação de mais um fotosensor para monitorar as condições climáticas durante a medição para garantir que não houve perturbação no meio.

Mudança da cubeta por um recipiente isolado que ainda mantenha o movimento do espelho dentro da amostra, desde que a amostra não reaja com estes materiais, afim de possibilitar o estudo de soluções em temperatura mais alta ou com rápida evaporação.

Inicialmente, a água foi utilizada como amostra para padronização das medições. Com a análise dos resultados, e outros trabalhos encontrados no final do trabalho, a amostra de padronização tornou-se objeto de estudo, requerindo uma avaliação mais aprofundada.

Correções no processo de medição podem aumentar a precisão, além de outras formas para contagem das franjas baseadas no ajuste parcial dos dados em vários trechos. Estas modificações possibilitarão outras medições para a água, além de comparação com resultados obtidos por Lente Térmica.

Bibliografia

- [1] H. Barrell and J. E. Sears, *The refraction and dispersion of air for visible spectrum*, Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences **238** (1939), no. 786, 1–64.
- [2] K. P. Birch and M. J. Downs, *The results of a comparison between calculated and measured values of the refractive index of air*, Journal of Physics E: Scientific Instruments (1988), no. 21, 694.
- [3] ———, *An updated Edlén equation for the refractive index of air*, Metrologia (1993), no. 30, 155.
- [4] Masahiko Daimon and Akira Masumura, *Measurement of the refractive index of distilled water from the near-infrared region to the ultraviolet region*, Applied Optics **46** (2007), no. 8, 3811.
- [5] Roberto do Nascimento Silva, Valdirene Neves Monteir, Joana D’Arc Ximenes Alcanfor, Elaine Meire Assis, and Eduardo Ramirez Asquieri, *Comparação de métodos para a determinação de açúcares redutores e totais em mel*, Ciência e Tecnologia de Alimentos **23** (2003), 337–341.
- [6] Bengt Edlén, *The dispersion of standard air*, Journal of the Optical Society of America **43** (1953), no. 5, 339.
- [7] Bengt Edlén, *The refractive index of air*, Metrologia **2** (1966), no. 2, 71.
- [8] J. B. Hawkes and R. W. Astheimer, *The temperature coefficient of the refractive index of water*, Journal of the Optical Society of America **38** (1948), no. 9, 804.
- [9] Franck E. Jones, *The air density equation and the transfer of the mass unit*, Tech. report, US National Bureau of Standards, July 1977.
- [10] Kent Kuhler, Eustace L Dereniak, and Michael Buchanan, *Measurement of the index of refraction of plastic phenoxy PKFE*, Applied Optics **30** (1991), no. 13, 1711.
- [11] Yu N Kulchin, O B Vitrik, and S O Gurbatov, *Effect of small variations in the refractive index of the ambient medium on the spectrum of a bent fibre-optic fabry ? perot interferometer*, Quantum Electronics **41** (2011), 821–823.
- [12] Ph. Marteau, G. Montixi, J. Obriot, T. K. Bose, and J. M. St.Arnaud, *An accurate method for the refractive index measurements of liquids: Application of the Kramers-Kronig relation in the liquid phase*, Review of Scientific Instruments **62** (1991), no. 1, 42.
- [13] E. Moreels, C. de Greef, and R. Finsy, *Laser light refractometer*, Applied Optics **23** (1984), no. 17, 3010.

- [14] U Müller, M Philipp, P-C Gervais, W Possart, C Wehlack, J Kieffer, R Sanctuary, and J K Krüger, *Combination of high-performance refractometry and infrared spectroscopy as a probe for chemically induced gelation and vitrification of epoxies*, *New Journal of Physics* **12** (2010), no. 8, 083036.
- [15] James C. Owens, *Optical refractive index of air: dependence on pressure, temperature and composition*, *Applied Optics* **6** (1967), no. 1, 51.
- [16] P. R. B. Pedreira, L. Hirsch, J. R. D. Pereira, A. N. Medina, A. C. Bento, and M. L. Baesso, *Temperature dependence of the thermo-optical properties of water determined by thermal lens spectrometry*, *Review of Scientific Instruments* **74** (2003), no. 1, 808.
- [17] G R C Possetti, R C Kamikawachi, C L Prevedello, M Muller, and J L Fabris, *Salinity measurement in water environment with a long period grating based interferometer*, *Measurement Science and Technology* **20** (2009), no. 3, 034003.
- [18] Daryl W. Preston and Eric R. Dietz, *The art of experimental physics*, John Wiley & Sons, New York (1991).
- [19] Bernold Richerzhagen, *Interferometer for measuring the absolute refractive index of liquid water as a function of temperature at 1.064 μ m*, *Applied Optics* **35** (1996), no. 10, 1650.
- [20] P. Schellekens, G. Wilkening, F. Reinboth, M. J. Downs, K. P. Birch, and J. Spronck, *Measurements of the refractive index of air using interference refractometers*, *Metrologia* (1986), no. 22, 279.
- [21] Rubens Silva, Marcos A. C. de Araújo, Pedro Jali, Sanclayton G. C. Moreira, Petrus Alcantara Jr., and Paulo C. de Oliveira, *Thermal lens spectrometry: optimizing amplitude and shortening the transient time*, *AIP Advances* **1** (2011), no. 1, 022154.
- [22] Arnold Wexler and Lewis Greenspan, *Vapor pressure equation for water in the range 0 to 100°C*, *Journal of Research of the National Bureau of Standards* **75A** (1971), no. 3, 213.
- [23] Y Zheng and J A Roberts, *The temperature dependency of some of the thermodynamical properties of aqueous binary mixture systems*, *Journal of Physics: Condensed Matter* **8** (1), 8089–8103.

APÊNDICE A – Contagem de franjas

Trecho do código fonte, em linguagem C, do programa de análise dos dados.

N1 e N2 são os números de franjas do feixe de referência e de prova, respectivamente.

N1=N2=0.;

A operação é feita do primeiro ao último (num) elemento de cada vetor de sinal.

for (i=1;i<num;i++)

{

Contagem das interseções com o eixo.

if ((med1[i]*med1[i+1]<0) N1 += 0.25;

if ((med2[i]*med2[i+1]<0) N2 += 0.25;

Contagem dos vales.

if (((med1[i-1]<med1[i] && (med1[i+1]<med1[i])) && (med1[i]>0)) N1+=0.25;

if (((med2[i-1]<med2[i] && (med2[i+1]<med2[i])) && (med2[i]>0)) N2+=0.25;

Contagem dos picos.

if (((med1[i-1]>med1[i] && (med1[i+1]>med1[i])) && (med1[i]<0)) N1+=0.25;

if (((med2[i-1]>med2[i] && (med2[i+1]>med2[i])) && (med2[i]<0)) N2+=0.25;

}

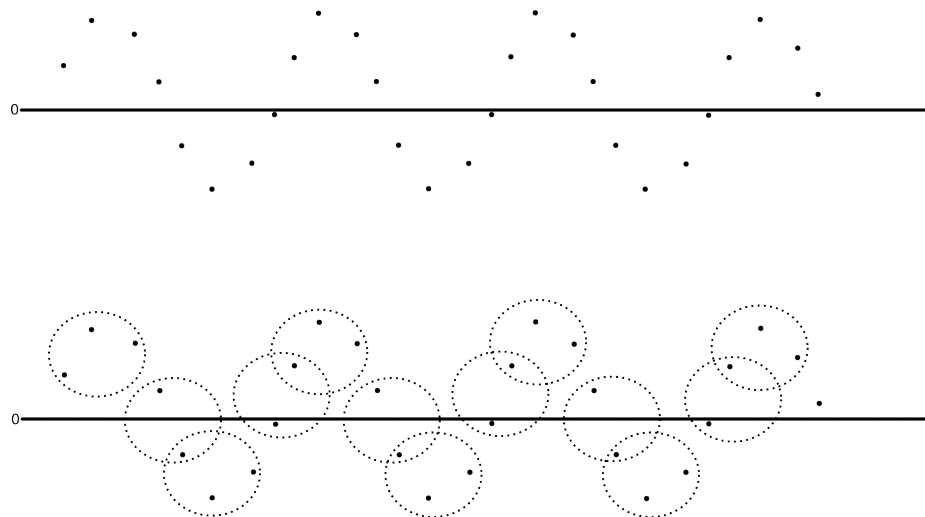


Figura A.1: Exemplo gráfico do algoritmo de contagem das franjas. Os círculos são as ocorrências positivas dos testes, resultando $13 \times (0,25 \text{ franja}) = 3,25 \text{ franjas}$

APÊNDICE B – Dados experimentais

n_{liq}	δ_n	T_{liq}	δ_T
1,332459	6,2e-06	15,55	5,8e-03
1,332457	2,6e-06	15,58	6,7e-03
1,332400	6,7e-07	16,27	5,8e-03
1,332383	4,0e-06	16,54	5,8e-03
1,332361	2,4e-06	16,79	8,8e-03
1,332345	2,3e-06	17,02	3,3e-03
1,332326	1,3e-06	17,27	8,8e-03
1,332309	1,3e-06	17,48	6,7e-03
1,332304	1,8e-06	17,53	5,8e-03
1,332291	2,2e-06	17,70	5,8e-03
1,332268	1,7e-06	17,91	3,3e-03
1,332250	2,6e-06	18,14	2,3e-02
1,332227	3,7e-06	18,47	6,7e-03
1,332218	3,7e-06	18,60	1,9e-02
1,332193	1,7e-06	18,86	3,3e-03
1,332179	1,0e-06	19,07	4,4e-03
1,332133	1,5e-06	19,57	3,3e-03
1,332109	1,1e-06	19,75	1,0e-02
1,332090	2,4e-06	20,00	1,0e-02
1,332068	2,9e-06	20,22	8,8e-03
1,332047	8,0e-07	20,45	3,3e-03
1,332033	5,3e-08	20,65	6,7e-03
1,332010	1,6e-06	20,84	3,3e-03
1,331988	1,6e-06	21,08	5,8e-03
1,331966	2,2e-06	21,32	6,7e-03
1,331943	7,6e-07	21,56	3,3e-03
1,331922	3,0e-06	21,77	5,8e-03
1,331896	1,6e-06	22,06	8,8e-03
1,331875	1,2e-06	22,30	6,7e-03
1,331849	1,5e-06	22,54	6,7e-03
1,331830	4,5e-06	22,79	2,2e-02
1,331805	1,1e-06	22,99	1,5e-02
1,331780	8,7e-07	23,24	1,0e-02
1,331756	2,7e-06	23,48	6,7e-03
1,331724	1,5e-06	23,80	5,8e-03
1,331691	2,3e-06	24,09	8,8e-03
1,331669	2,7e-06	24,30	6,7e-03
1,331650	9,3e-06	24,57	1,0e-02
1,331606	2,2e-06	24,86	2,3e-02
1,331581	2,0e-06	25,14	1,3e-02
1,331552	8,9e-07	25,40	8,8e-03
1,331520	1,9e-06	25,67	8,8e-03
1,331489	2,8e-06	25,97	1,0e-02
1,331453	1,9e-06	26,27	8,8e-03
1,331446	1,7e-06	26,43	1,0e-02

Tabela B.1: Água deionizada. n - índice de refração para luz de comprimento de onda de 632,8 nm, T - temperatura do líquido em °C.

n_{liq}	δ_n	T_{liq}	δ_T	n_{liq}	δ_n	T_{liq}	δ_T
1,331422	2,0e-06	26,56	1,2e-02	1,330621	5,2e-07	33,31	1,3e-02
1,331431	3,6e-06	26,58	3,3e-03	1,330568	2,6e-06	33,66	1,2e-02
1,331401	5,0e-06	26,84	1,2e-02	1,330515	1,7e-06	34,06	1,2e-02
1,331398	3,8e-06	26,87	1,5e-02	1,330469	5,8e-06	34,42	1,5e-02
1,331379	6,0e-07	27,08	1,3e-02	1,330414	4,5e-06	34,80	8,8e-03
1,331346	2,8e-06	27,33	1,3e-02	1,330363	4,4e-06	35,19	6,7e-03
1,331312	3,3e-07	27,63	1,3e-02	1,330327	6,3e-06	35,43	1,0e-02
1,331277	3,2e-06	27,93	1,7e-02	1,330260	2,3e-06	35,92	2,3e-02
1,331242	8,4e-07	28,24	1,0e-02	1,330244	1,8e-06	36,02	2,5e-02
1,331206	3,9e-06	28,59	1,7e-02	1,330188	4,9e-06	36,44	1,7e-02
1,331170	2,0e-06	28,85	1,3e-02	1,330127	5,2e-06	36,87	2,1e-02
1,331141	6,4e-07	29,13	5,8e-03	1,330064	2,5e-06	37,34	1,8e-02
1,331108	1,7e-06	29,41	5,8e-03	1,330006	3,4e-06	37,84	2,0e-02
1,331065	1,6e-06	29,74	1,2e-02	1,329954	2,0e-06	38,25	1,9e-02
1,331027	3,2e-07	30,06	6,7e-03	1,329912	3,8e-06	38,55	8,8e-03
1,330985	8,8e-07	30,42	1,2e-02	1,329864	3,2e-06	38,90	1,7e-02
1,330939	3,0e-06	30,76	6,7e-03	1,329846	3,1e-06	39,04	2,1e-02
1,330869	5,9e-07	31,34	1,8e-02	1,329763	6,4e-06	39,43	2,7e-02
1,330838	2,6e-06	31,60	1,0e-02	1,329730	8,8e-06	39,67	3,5e-02
1,330789	2,7e-06	31,98	1,2e-02	1,329709	5,8e-06	39,90	2,3e-02
1,330749	4,7e-06	32,29	1,5e-02	1,329674	3,6e-06	40,18	2,4e-02
1,330708	1,7e-06	32,62	1,5e-02	1,329631	2,8e-06	40,48	1,2e-02
1,330663	4,2e-06	32,96	1,2e-02	1,329581	1,8e-06	40,73	1,5e-02

Tabela B.2: Água deionizada. n - índice de refração para luz de comprimento de onda de 632,8 nm, T - temperatura do líquido em °C.