

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA  
CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL ELETRÔNICA

BRUNO THIMÓTEO DE SOUZA  
RICARDO SIEBENROK ODORCZYK

**Medidor Eletrônico de Densidade de Líquidos utilizando Refração**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Curitiba  
2013

**BRUNO THIMÓTEO DE SOUZA**  
**RICARDO SIEBENROK ODORCZYK**

**Medidor Eletrônico de Densidade de Líquidos utilizando Refração**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior de Engenharia Industrial Elétrica com Ênfase em Eletrônica e Telecomunicações do Departamento Acadêmico de Eletrônica – DAELN – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro.

Orientador: Prof. Dr. Rubens Alexandre Faria

Curitiba  
2013

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

**BRUNO THIMÓTEO DE SOUZA**  
**RICARDO SIEBENROK ODORCZYK**

Medidor Eletrônico de Densidade de Líquidos utilizando Refração

Trabalho de conclusão de curso aprovado como requisito à obtenção do grau de Engenheiro, do Curso Superior de Engenharia Industrial Elétrica com Ênfase em Eletrônica e Telecomunicações do Departamento Acadêmico de Eletrônica – DAELN – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR.

---

Prof. Dr. Rubens Alexandre Faria  
Professor orientador

---

Prof. Dr. Kleber Horikawa Nabas  
Professor convidado

---

Prof. Dr. Richard Demo Souza  
Professor da comissão de TCC

Curitiba, 22 de Abril de 2013.

## RESUMO

SOUZA, Bruno Thimóteo de; ODORCZYK, Ricardo Siebenrok. Medidor Eletrônico de Densidade de Líquidos utilizando Refração. 2013. 82f. Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Engenharia Industrial Elétrica com Ênfase em Eletrônica e Telecomunicações da Universidade Federal Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

Atualmente equipamentos de medição de densidade de líquidos deixam a desejar em alguns aspectos, por isto este trabalho apresenta o desenvolvimento de um instrumento para a medição de densidade de líquidos utilizando refração, compondo este módulos eletrônicos de *hardware* e *software*, e módulos mecânicos de óptica, junto com os procedimentos de calibração para operá-los. Para tal foi realizada uma pesquisa bibliográfica sobre metrologia, densidade e óptica. Foram realizados também testes de prova de conceito, calibração e validação de resultados. Nos testes realizados foram utilizados misturas de combustível etanol-água. Com isto foi possível constatar que a frequência de operação da fonte luminosa interfere no resultado final do índice de refração, que os resíduos de amostras não geram erro significativamente grande, e que a utilização de misturas de álcool com água impossibilita o uso do aparelho desenvolvido para identificação de fraude em combustíveis, pois sua característica química gera uma região de ambiguidade na faixa de medição do sistema.

**Palavras-Chave:** Refratômetro. Densidade. Índice de refração. Etanol-água.

## ABSTRACT

SOUZA, Bruno Thimóteo de; ODORCZYK, Ricardo Siebenrok. Measuring Equipment for Liquids Density using Refraction. 2013. 82p. Graduation Project of Industrial Electronics Engineering of the Technological Federal University of Parana. Curitiba, 2013.

Nowadays the equipments for measuring the density of liquids are not satisfying the user in some aspects, so that this project presents the development of a measurement instrument for liquid density using the refraction principles, composed by electronics modules divided in hardware and software, and a mechanical optical module, and the calibration procedures. For that was performed a research on metrology, density and optical concepts. There were performed some tests for the proof of concept, calibration and validation of the results. On those tests were used the fuel mixture of ethanol and water. With that was possible to verify that the frequency on which the light emitter operates can interfere on the result of the refraction index calculation, that the residual left on the recipient by the last sample do not generate a significative error, and that using the mixture ethanol-water invalidates the usage of the instrument on identifying the fraud on fuels, as the its chemical characteristics agenerates a region of ambiguity at the system.

Palavras Chave: Refractometry. Density. Index of refraction. Etanol-water.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Diagrama de funcionamento do projeto.....	15
Figura 2	Tipos de erros.....	18
Figura 3	Exatidão e precisão.....	19
Figura 4	Distribuição normal.....	21
Figura 5	Curva de erros.....	24
Figura 6	Calibração direta de um sistema.....	25
Figura 7	Calibração indireta de um sistema.....	26
Figura 8	Roteiro de calibração.....	26
Figura 9	Hidrômetro.....	29
Figura 10	Hidrômetro de volume constante.....	30
Figura 11	Hidrômetro autocompensado.....	30
Figura 12	Escala de valor de densidade.....	31
Figura 13	Medidor de pressão.....	32
Figura 14	Sensores de radiação.....	33
Figura 15	Sensores por vibração.....	33
Figura 16	Quadro de modelos de refratômetros.....	34
Figura 17	Escala de refratômetros analógicos.....	35
Figura 18	Refração do meio incidente e transmissor.....	37
Figura 19	Dobramento da água.....	38
Figura 20	Índice de refração.....	38
Figura 21	Prisma de dispersão.....	41
Figura 22	Prisma de reflexão.....	41
Figura 23	Diagrama de blocos do projeto.....	44
Figura 24	Microcontrolador usado no projeto -arduino Mega.....	45
Figura 25	Diagrama de blocos do micro-controlador no sistema.....	45
Figura 26	Fluxograma de funcionamento do micro-controlador.....	46
Figura 27	Módulo laser utilizado com fonte luminosa do sistema.....	47
Figura 28	Vetor de foto-diodos 768 pixels modelo tsl1406r da taos.....	48
Figura 29	Interface.....	49
Figura 30	Gráfico da captura do sensor.....	50
Figura 31	Cálculo do desvio.....	51
Figura 32	Valores para projetar.....	52
Figura 33	Plataforma.....	54
Figura 34	Peça para suporte do sensor no anteparo.....	55
Figura 35	Estrutura mecânica proposta.....	55
Figura 36	Gabaritos para a montagem do sensor horizontalmente.....	56
Figura 37	Gabarito para montagens de prisma vertical.....	56
Figura 38	Projeto e construção da caixa de madeira.....	57
Figura 39	Caixa pronta.....	58
Figura 40	Roteiro de medição.....	59
Figura 41	Medição de densidade da mistura etanol água por densímetro....	60
Figura 42	Gráfico de densidade das amostras.....	61
Figura 43	Refratômetro de bancada utilizado no levantamento.....	62
Figura 44	Fluxograma teste 1.....	64
Figura 45	Fluxograma teste 2.....	67
Figura 46	Fluxograma teste 3.....	70

Figura 47	Gráfico de comparação dos índices de refração para o aparelho desenvolvido e para o apralhe de bancada usado como referência.....	73
Figura 48	Diferença de desvio para dispersão de cores.....	74
Figura 49	Curva de índice de refração por concentração destacando região de ambiguidade.....	77

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Fórmulas.....	20
Tabela 2	Desvio padrão das médias.....	21
Tabela 3	Valores para $l=5$ cm.....	52
Tabela 4	Valores para $l= 10$ cm.....	52
Tabela 5	Valores para $l= 20$ cm.....	52
Tabela 6	Valores para $l= 30$ cm.....	53
Tabela 7	Levantamento de densidade da mistura etanol- água.....	59
Tabela 8	Índices de refração levantados.....	61
Tabela 9	Média dos índices de refração medidos pela concentração.....	62
Tabela 10	Levantamento de dados para o teste 1 com prisma $63^\circ$ para água pura deionizada.....	63
Tabela 11	Levantamento de dados para o teste 1 com prisma $63^\circ$ para amostra com 50% de álcool.....	64
Tabela 12	Levantamento de dados para o teste 1 com prisma $63^\circ$ para amostra com álcool puro - 98%.....	64
Tabela 13	Levantamento de dados para o teste 1 com prisma $73^\circ$ para água pura deionizada.....	65
Tabela 14	Levantamento de dados para o teste 1 com prisma $73^\circ$ para amostra com 50% de álcool.....	65
Tabela 15	Levantamento de dados para o teste 1 com prisma $73^\circ$ para amostra com álcool puro - 98%.....	65
Tabela 16	Levantamento de dados para o teste 1 com prisma $63^\circ$ para água pura deionizada.....	67
Tabela 17	Levantamento de dados para o teste 1 com prisma $63^\circ$ para amostra com 50% de álcool.....	67
Tabela 18	Levantamento de dados para o teste 1 com prisma $63^\circ$ para amostra com álcool puro - 98%.....	67
Tabela 19	Levantamento de dados para o teste 1 com prisma $73^\circ$ para água pura deionizada.....	68
Tabela 20	Levantamento de dados para o teste 1 com prisma $73^\circ$ para amostra com 50% de álcool.....	68
Tabela 21	Levantamento de dados para o teste 1 com prisma $73^\circ$ para amostra com álcool puro - 98%.....	69
Tabela 22	Tabela de parâmetros metrológicos.....	74

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	12
1.1	JUSTIFICATIVA.....	12
1.2	OBJETIVOS.....	13
1.2.1	Objetivo Geral.....	13
1.2.2	Objetivos Específicos.....	13
1.2.3	Diagrama.....	14
1.3	METODOLOGIA.....	15
1.4	APRESENTAÇÃO DO DOCUMENTO.....	15
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	16
2.1	METROLOGIA.....	16
2.1.1	Erro de medição.....	16
2.1.2	Calibração de sistema de medição.....	22
2.2.2	Densidade de líquidos.....	26
2.2.2.1	Propriedades.....	26
2.2.2.2	Unidades.....	27
2.2.2.3	Aplicações de medição de densidade.....	28
2.2.3	Técnicas de medição de densidade de líquidos.....	28
2.2.3.1	Hidrômetros e transmissores.....	28
2.2.3.2	Sensores tipo deslocamento.....	30
2.2.3.3	Sensores tipo pressão hidrostática.....	30
2.2.3.4	Sensores tipo radiação.....	31
2.2.3.5	Sensores por vibração.....	32
2.2.3.6	Refratometria.....	32
2.3	ÓPTICA.....	35
2.3.1	Propagação da luz.....	35
2.3.2	Reflexão.....	35
2.3.3	Refração.....	36
2.3.4	Cálculo de geometria de prismas.....	38
2.3.5	Refratometria.....	41
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b> .....	43
3.1	ELETRÔNICA.....	43
3.1.1	<i>Hardware</i> .....	44
3.1.2	<i>Software</i> .....	46
3.1.2.1	<i>Firmware</i> .....	47
3.1.2.2	Processamento de dados.....	47
3.1.2.3	Interface.....	48
3.2	MECÂNICA.....	49
3.2.1	Geometria Óptica.....	49
3.3.2	Estrutura Mecânica.....	51
3.4	MEDIDAS E CALIBRAÇÃO.....	57
<b>4</b>	<b>TESTES E RESULTADOS</b> .....	71
4.1	Teste de funcionamento.....	71
4.2	Testes de calibração.....	73
4.3	Teste de validação.....	75
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	77
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	80

## 1 INTRODUÇÃO

Quando se trata de medição de densidade de líquidos pode-se citar inúmeros instrumentos capazes de realizar esta medida, através de diversas técnicas diferentes, através da vibração, pressão hidrostática, flutuação de corpos e refração. Os instrumentos de utilização mais comuns são o densímetro, "um aparelho que é um pouco mais leve do que a água e flutua em alturas diferentes dependendo da densidade do líquido" (PLANETSEED, 2013), e o refratômetro, um aparelho que refrata a luz em diferentes posições com a variação de densidade do líquido, e através disto são capazes de indicar a densidade da substância.

### 1.1 JUSTIFICATIVA

Os diferentes instrumentos de medição de densidade de líquidos disponibilizados no mercado podem ser mecânicos ou eletrônicos. Os mecânicos proporcionam uma difícil leitura dos dados, pois dependem dos sentidos humanos, podendo tornar seus resultados imprecisos. Já os eletrônicos possuem boa precisão, no entanto, seu custo é de aproximadamente cinco vezes maior que o mecânico. No entanto, indiferente de funcionamento ser eletrônico ou mecânico, o instrumento mais recomendado pelos usuários é o refratômetro, afim de uma maior confiabilidade e facilidade de uso, comparado aos outros instrumentos.

Existem refratômetros portáteis e de bancada para analisar substâncias secas e diferentes misturas, como os que medem o conteúdo de água e açúcares no mel, em líquidos sem pigmentação de cor para medir o teor alcoólico, também para medir o grau de álcool provável da uva utilizada em vinhos, bem como o grau de concentração de refrigerantes e espessantes, além de refratômetros para analisar produtos de limpeza, urina e outras substâncias e para diversas aplicações diferenciando-os pela escala (PCE, 2013). São utilizados também na produção de cervejas artesanais: medindo a gravidade do mosto com o intuito de controlar a fermentação e determinar o percentual alcoólico da bebida; na prática de aquarismo: verificando a concentração de sal na água dos aquários; e para a identificação de fraude em combustíveis.

Por esta razão, o tema deste trabalho justifica-se devido a dificuldade de se encontrar no mercado produtos com a finalidade de medição de densidade de líquidos que combinem um custo acessível, confiabilidade de medida, precisão e principalmente facilidade de uso e dimensionamento.

Evidencia-se a necessidade do seu fácil manuseio e portabilidade, boa precisão e preço acessível. Neste contexto, a proposta é estudar os princípios da refração aplicando-os no desenvolvimento de um protótipo que se enquadre nas necessidades apresentadas previamente.

## 1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um medidor eletrônico de densidade de líquidos utilizando o princípio físico da refração através de uma pesquisa referente às técnicas existentes de medição de densidade de líquidos em conjunto com o estudo também realizado sobre a física óptica e metrologia, realizando a construção de um sistema mecânico e eletrônico capaz de extrair as informações necessárias de um fluido a ponto de identificar qual é a sua densidade, e com a realização de variados testes, avaliar seus resultados.

### 1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver um medidor eletrônico de densidade de líquidos utilizando o princípio físico da refração, visando a avaliação deste método.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

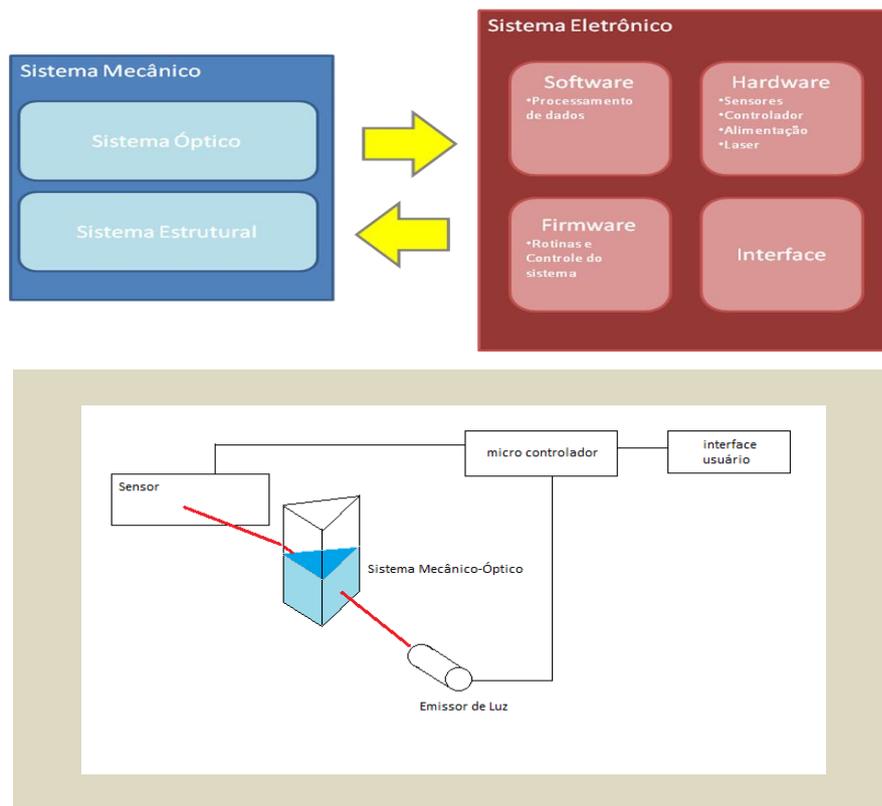
- Construir um sistema mecânico-óptico para transformar variáveis externas em dados de entrada para o sistema eletrônico.
- Desenvolver *hardware* (processamento e sensores) e *firmware* para medição.
- Identificar escala da densidade de líquidos.
- Determinar procedimento de calibração.

### 1.2.3 Diagrama

O projeto consiste num sistema de medição, composto por dois subsistemas que interagem entre si, um eletrônico e um mecânico, representados na Figura 1.

O sistema eletrônico, através de um microcontrolador, realiza o acionamento de uma fonte luminosa que terá seu feixe projetado através de um sistema óptico, que compõe parte do sistema mecânico e é responsável por entregar aos sensores as informações sobre um fluido contido neste sistema.

Através da leitura de sensores de temperatura e deslocamento, o sistema eletrônico, através de um microcontrolador, é capaz de processar estes dados e indicar qual o índice de refração e qual a densidade do líquido contido no sistema mecânico, conforme mostra a Figura 1.



**Figura 1- Diagrama em blocos do projeto**  
**Fonte – O autor (2013)**

É importante ressaltar que o sistema será controlado através de uma interface com o usuário.

### 1.3 METODOLOGIA

Este trabalho é o resultado de uma pesquisa aplicada, cujos procedimentos utilizados para alcançar os objetivos foram realizados por via de uma pesquisa bibliográfica do material já publicado sobre o tema e a observação dos equipamentos similares existentes no mercado, servindo como base e ponto de partida para a posterior construção dos sistemas mecânico e eletrônico do projeto que compõem um medidor eletrônico de densidade de líquidos, além dos testes de funcionamento e ensaios do mesmo. Subseqüente, foi validado, e seus resultados analisados conforme a revisão de literatura para finalmente obter as considerações finais, tendo como resultado do projeto um protótipo do modelo de funcionamento proposto e a análise de seu desempenho e resultados tomados por base na revisão de literatura, conduzindo às considerações finais e conclusões do trabalho.

### 1.4 APRESENTAÇÃO DO DOCUMENTO

Este documento será dividido em 5 capítulos:

O capítulo 1, apresenta a introdução, justificativa, objetivos e metodologia da pesquisa;

O capítulo 2, contém a revisão de literatura, sobre metrologia, densidade e óptica, para embasamento da parte prática;

O capítulo 3, descreve o desenvolvimento mecânico e eletrônico do projeto, além da descrição dos processos adotados na calibração e levantamento de dados.

O capítulo 4, expõe os testes realizados e os resultados obtidos e apresenta a discussão e análise destes.

E finalmente o capítulo 5, conclui o trabalho com as considerações finais.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta a revisão de literatura sobre medição e densidade de líquidos e conceitos de óptica, com o objetivo de nortear a parte prática deste trabalho.

### 2.1 METROLOGIA

Inúmeras ações que ocorrem ao nosso redor tem por objetivo controlar, monitorar, comparar e investigar. Estas ações usam como critério de julgamento números ou parâmetros, resultantes de um processo de medição, um procedimento experimental, para determinar o valor instantâneo de uma grandeza, chamada de mensurando. Dentro deste processo existem vários conceitos e práticas importantes de serem levados em consideração para que este valor momentâneo seja identificado corretamente para ser utilizado de maneira eficiente em seu objetivo final ( ALBERTAZZI; SOUZA, 2008). Conforme Lira (2001), os instrumentos de medição servem como uma extensão das capacidades humanas para tornar possível o conhecimento do verdadeiro valor de uma medida.

#### 2.1.1 Erro de medição

Ao realizar uma medida o valor apresentado pelo sistema de medição deveria corresponder ao exato valor do mensurando. Porém, existem fatores que interferem gerando erros de medição, como as imperfeições do sistema de medição, as limitações do operador e as condições ambientais. Eles podem ser reduzidos, mas não eliminados totalmente do resultado ( ALBERTAZZI; SOUZA, 2008).

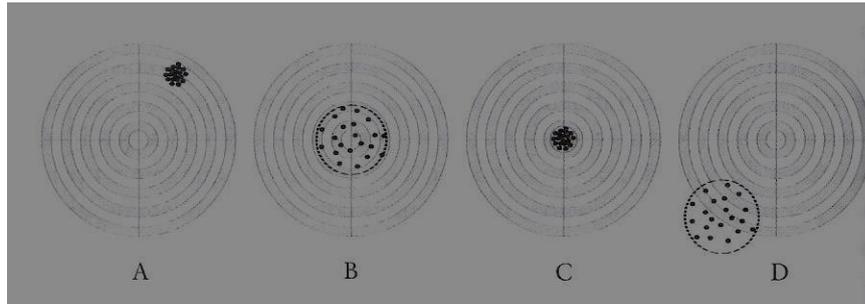
O erro de medição é definido como, "a diferença entre a indicação de um instrumento e o valor verdadeiro da grandeza de entrada" (LIRA, p: 32 2001), ele pode ter duas classificações, como ilustrado na Figura 2, o erro sistemático e o erro aleatório, onde o sistemático pode ser previsível e o aleatório, imprevisível, responsável pelos resultados diferentes em repetições (ALBERTAZZI; SOUZA, 2008).



**Figura 2 - Tipos de erros**  
**Fonte - O autor adaptado de Albertazzi; Souza (2008)**

Outros dois parâmetros que devem ser levados em consideração tratando-se de um sistema de medição, são a precisão e a exatidão. “Essas características qualitativas referem-se ao desempenho do sistema. A exatidão é a capacidade de um sistema funcionar sem erros, tendo sempre um ótimo desempenho” (ALBERTAZZI; SOUZA p: 42, 2008), e a precisão caracteriza-se pela pouca dispersão nos resultados obtidos, “é a capacidade de obter sempre o mesmo resultado quando repetições são efetuadas”( ALBERTAZZI; SOUZA p: 42, 2008).

Na Figura 3 é possível compreender bem o sentido de precisão e exatidão. O alvo C representa um sistema com boa exatidão, devido à mínima quantidade de erros, e também um sistema preciso, pois apresenta pouca dispersão em seus resultados. O alvo B representa o resultado de um sistema que possui certa exatidão, porém pouca precisão, pois há um espalhamento muito grande de seus resultados, porém alguns deles apresentam uma taxa de erro pequena correspondente ao resultado desejado, tendo alguns deles acertado o centro do alvo. O alvo A no entanto, não tem em seus resultados um sistema exato, pois apresentam um erro muito grande, mas representa um sistema preciso, pois ocorre pouca dispersão entre seus resultados, como pode-se observar, está longe do centro, porém todos resultados muito próximos uns dos outros. E por fim, o alvo D, que representa um sistema sem exatidão e sem precisão, pois além de representar um erro grande representando a falta de exatidão, tendo seus resultados muito afastados do centro, que era o ponto desejado, estes estão muito afastados entre si, representando a falta de precisão.



**Figura 3 - Exatidão e precisão**  
**Fonte - Albertazzi; Souza (2008)**

Ainda segundo Albertazzi; Souza (2008), por se tratar de uma característica previsível, é possível determinar o erro sistemático por meio de medições recorrentes de um único mensurando, com valor conhecido, através da equação 1:

$$Es = I_{\infty} - VV \quad (1)$$

Onde  $Es$  é igual ao erro sistemático;  $I$  é a média do número de indicações infinitas realizadas pelo sistema e  $VV$  o valor verdadeiro do mensurando. Contudo, esta equação apresenta algumas limitações, pois não há o conhecimento exato do mensurando e não há tempo para efetuar infinitas medições e calcular sua média.

Com isto, realiza-se uma estimativa aproximada do erro sistemático em experimentos práticos, conhecida por tendência. A tendência é calculada por:

$$Td = I_n - VVC, \quad (2)$$

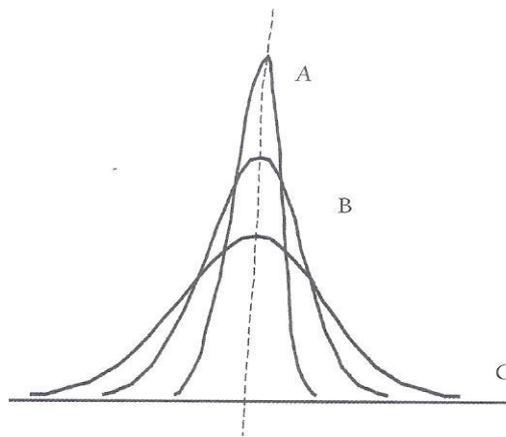
onde,  $Td$  representa a tendência, estimativa do erro sistemático,  $I$  representa a media de um numero finito de resultados obtidos de medições e  $VVC$  o valor convencional verdadeiro, uma estimativa próxima do valor verdadeiro do mensurando.

Ainda segundo Albertazzi e Souza (2008), desta forma, é possível identificar qual o erro que está sendo gerado por um sistema, e da mesma maneira, corrigi-lo. Contudo, é importante levar em consideração que também existe o erro aleatório, e que este é imprevisível, mas pode ser calculado após uma medição ser realizada, com a seguinte fórmula:

$$Ea_n = I_n - I_{med} \quad (3)$$

Onde  $Ea_n$  corresponde ao erro aleatório da  $n$ -ésima leitura da medição,  $I_n$  a  $n$ -ésima leitura da medição e  $I_{med}$  a média das leituras. Através deste cálculo, é então possível observar que muitas vezes os valores de erro aleatório obtidos ficam restritos a uma determinada faixa de valores ao redor do valor médio das indicações, sendo esta uma das propriedades do erro aleatório. Denomina-se então esta faixa de valores dentro da qual o erro de um sistema de medição é esperado, de repetitividade, que assume valores simétricos em torno do valor médio. Desta maneira, é possível afirmar que o comportamento do erro aleatório de medição se enquadra bem numa representação por distribuição normal ou Gaussiana. A componente aleatória do erro de medição pode ser composta por diversos fatores que agem sobre o processo de medição, de maneira combinada e simultânea (ibid).

A distribuição normal (Figura 4) é caracterizada por ser uma figura simétrica, e apresentar dois parâmetros essenciais: o desvio-padrão e a média.



**Figura 4 - Distribuição normal**  
**Fonte - Albertazzi; Souza (2008)**

A média corresponde ao ponto de simetria da imagem e o desvio-padrão é uma medida do grau de dispersão desta distribuição. Seu valor é indicado pela distância do ponto de inflexão da curva gaussiana até o ponto de simetria. O ponto de inflexão é o exato momento onde a tendência da curva da distribuição muda a direção de sua concavidade e o raio de curvatura torna-se infinito. Diferentes valores de desvios-padrão fazem referência à fenômenos com diferentes características, podendo ter maior ou menor dispersão .

Este desvio-padrão tem por característica identificar de maneira quantitativa a intensidade da componente aleatória apresentada no erro de medição, denominada por incerteza-padrão.

É importante lembrar que para que estes parâmetros a serem levantados tenham um valor confiável e efetivo, os experimentos feitos para obtê-los tem que ser realizados inúmeras vezes e em uma grande quantidade de amostras.

O desvio-padrão pode então ser calculado de duas maneiras, ou considerando o universo total de elementos, conhecido por população, ou calculado a partir de amostras desta população. Normalmente quando é realizado da segunda maneira, a incerteza-padrão corresponde ao desvio-padrão da amostra e deve ser associado a ela o número de graus de liberdade com qual foi estimada (ALBERTAZZI; SOUZA, 2008). As fórmulas para calcular estes parâmetros descritos encontram-se na TABELA 1.

Tabela 1 - Fórmulas

VARIÁVEL	FÓRMULA
DESVIO-PADRÃO	$\sigma = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_i - \bar{I})^2}{n}}$
DESVIO-PADRÃO DA AMOSTRA	$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_i - \bar{I})^2}{n - 1}}$
INCERTEZA-PADRÃO DA AMOSTRA	$u = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_i - \bar{I})^2}{v}}$
GRAUS DE LIBERDADE	$v = n - 1$
REPETITIVIDADE	$Re = \pm t \cdot u$

FONTE- O autor adaptado de Albertazzi; Souza (2008)

Portanto a incerteza-padrão e a repetitividade são os parâmetros que tornam possível a quantificação da intensidade do erro aleatório em um sistema de medição. É possível dizer também que o erro aleatório da média de medições é menor que o erro aleatório de indicações individuais, o que torna possível a redução da influência do erro aleatório sob as repetições de medição efetuadas. Com isso, o desvio-padrão das médias (Tabela 2), acaba sendo menor que o desvio-padrão dos indivíduos, e por consequência, a incerteza-padrão e a repetitividade da média também são reduzidas (ALBERTAZZI; SOUZA, 2008).

Tabela 2 - Fórmulas Para As Médias

VARIÁVEL	FÓRMULA
DESVIO-PADRÃO DA MÉDIA	$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}}$
INCERTEZA-PADRÃO DA MÉDIA	$u_{\bar{I}} = \frac{u}{\sqrt{n}}, u_{\bar{I}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_i - \bar{I})^2}{n \cdot (n-1)}}$
REPETITIVIDADE DA MÉDIA	$Re_{\bar{I}} = \frac{Re_I}{\sqrt{n}} = \frac{t \cdot u}{\sqrt{n}}$

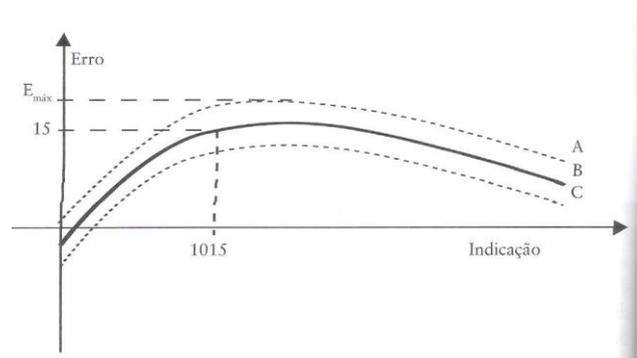
FONTE - O autor adaptado de Albertazzi; Souza (2008)

Um número consideravelmente grande de repetições pode reduzir o erro aleatório de tal forma que este possa ser considerado praticamente inexistente. Porém, é uma técnica que torna-se inviável na prática, pois exige um tempo muito grande para obter o número de medições necessárias. Considerando a redução dos erros aleatórios, é importante ressaltar que a média não possui influência alguma sobre os erros sistemáticos (ibid).

Sabe-se então que é possível estimar a parcela sistemática do erro através do cálculo de correção pela tendência e usá-lo para compensar o sistema, e que também é possível estimar a repetitividade, a faixa dentro da qual o erro aleatório é esperado. No entanto, isto não significa que todos os erros obtidos pelo sistema de medição estarão presentes dentro da faixa de erros prevista. "O comportamento do sistema de medição não é sempre o mesmo em todos os pontos da faixa de medição" (ALBERTAZZI; SOUZA p: 65,2008), podendo ser por motivos operacionais ou construtivos, o que torna conveniente que seja determinado a repetitividade e a tendência para vários pontos da faixa de medição do sistema. Com estas informações é possível representar de maneira gráfica a distribuição dos erros aleatórios e sistemáticos ao longo da faixa de medição de um sistema (ibid).

Tal curva, como mostrado na Figura 5, é formada por três linhas, a linha T que possui os valores da tendência, a linha LS que contém os erros calculados pela soma da tendência com a repetitividade, representando o limite superior da faixa, e a linha LI que contém os erros calculados pela subtração da tendência com a repetitividade, representando o limite inferior da faixa. A faixa extrema, representada pela curva do limite superior, é delimitada por um valor chamado erro máximo, o qual

representa o erro com maior valor absoluto que o sistema de medição pode cometer (ALBERTAZZI; SOUZA, 2008).



**Figura 5 - Curva de erros**  
**Fonte - Albertazzi; Souza (2008)**

Albertazzi e Souza (2008) ainda afirmam que as informações que podem ser obtidas pela curva, tornam possível obter a correção e a repetitividade para cada valor indicado pelo sistema de medição.

Lembrando que todos estes erros podem ser causados por fatores internos e externos ao sistema de medição, que são conhecidos como fontes de erros.

Outro fator que também deve ser levado em conta como fonte de erros, é a interação do sistema com o operador. O manuseio, a acuidade visual, a interpretação do operador, entre muitos outros fatores humanos podem colaborar para o aparecimento de erros no valor medido pelo sistema (ALBERTAZZI; SOUZA, 2008). Por fim, é importante ressaltar que o sistema de medição pode ser afetado por várias fontes de erros, paralela e simultaneamente, podendo estes ser aleatórios ou sistemáticos.

### 2.1.2 Calibração de sistema de medição

Um sistema de medição nunca será isento de erros, podendo estes erros ocorrerem com um maior ou menor grau, e para garantir a confiabilidade de seus resultados é necessária a realização de um procedimento chamado calibração.

Conforme Lira (2001), a calibração é uma série de fatores que terá como consequência a qualidade da medida, através da confirmação da confiabilidade do instrumento utilizado. Com isso, Albertazzi e Souza (2008) complementa que este procedimento, também conhecido por afeição, é realizado de maneira experimental,

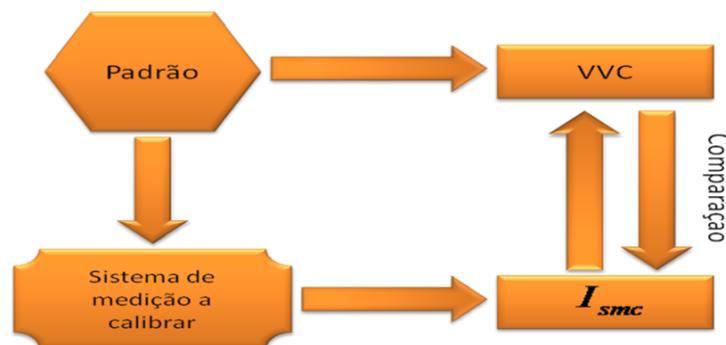
por meio de um conjunto de operações sob condições especificadas que através de um modelo de referência, é capaz de caracterizar o desempenho usual de um instrumento, e não é restrito apenas aos sistemas de medição.

Estes modelos de referência utilizados na calibração são também chamados padrões, uma medida materializada capaz de reproduzir um determinado valor para ser utilizado como referência na medição.

Mas segundo Lira (2001), após uma calibração ser realizada, seu resultado é normalmente registrado em forma de um documento, que pode ser chamado de certificado de calibração. É neste documento que estão contida as informações sobre o procedimento de calibração, as condições e uma série de outras informações metrológicas referentes ao instrumento e seu desempenho.

Já Albertazzi e Souza (2008) comenta que além da calibração, existem também outros procedimentos correlatos à ela como a verificação, o ajuste e a regulagem. A verificação trata-se de uma calibração simplificada, com o objetivo de testar se o sistema de medição está em conformidade com as especificações técnicas. O ajuste é uma ação corretiva focada em garantir que o resultado obtido pelo sistema de medição esteja em conformidade com as especificações técnicas, e a regulagem é um ajusta, só que utilizando apenas os mecanismos disponíveis aos usuários. Entretanto, existem várias maneiras de se calibrar um sistema de medição:

- Calibração direta (Figura 6) - quando o valor de referência utilizado tem suas medidas materializadas e conhecidas, e então é submetido à medições que vão indicar o valor que o sistema de medição indica para uma grandeza conhecida, e então, ajusta-se o sistema de medição para que sua indicação esteja em conformidade com os valores requeridos.



**Figura 6 - calibração direta de um sistema**  
**Fonte - Adaptado de Albertazzi; Souza (2008)**

- Calibração indireta - este tipo de calibração, representada na Figura 7, é feita por dois sistemas de medição, o sistema a calibrar e um sistema auxiliar. Este tipo de calibração acontece porque algumas grandezas não podem ser materializadas, então um dispositivo auxiliar gera um valor equivalente ao da grandeza;



**Figura 7 - Calibração indireta de um sistema**  
**Fonte - Adaptado de Albertazi; Souza (2008)**

- Calibração *in loco* - este tipo de calibração acontece quando as condições de uso sistema de medição variam muito das suas condições de calibração. Para isto é então necessário que a calibração do instrumento seja feita em laboratório, onde todas as condições possíveis possam ser controladas, para que se possa obter um resultado confiável durante o uso do instrumento.

Existe também uma característica importante quando se trata da comparação de sistema de medição, a rastreabilidade, que é a propriedade de um resultado de medição que o relaciona com sistemas de medição nacional ou internacional através "de uma cadeia contínua de comparações, tendo as incertezas estabelecidas"(ALBERTAZZI e SOUZA, 2008, p.141). Ela é uma característica muito importante dos padrões de medida, pois garante a uniformidades das medidas a nível internacional.

E por fim, como dito anteriormente, a calibração é um conjunto de ações realizadas para garantir a confiabilidade de um sistema, basicamente submetendo-o a valores conhecidos e avaliando seus resultados. Tomando isto por base, existe um roteiro padronizado de ações para que a calibração seja realizada, simplificado pela

Figura 8, na qual é possível identificar oito etapas pelas quais é necessário passar para realizar a calibração de um instrumento (ALBERTAZZI E SOUZA, 2008).



**Figura 8 - Roteiro de calibração**

Fonte - O autor adaptado de Albertazzi e Souza

A primeira etapa consiste em definir o nível de abrangência da calibração, dependendo do destino final dos dados, se é para fazer o ajuste e regulagem do sistema, determinar os valores de correção para compensação dos erros sistemáticos, levantar dados para verificação, ou até mesmo avaliar o sistema por completo.

A segunda etapa, de caracterização do sistema, consiste em identificar as características metrológicas e operacionais do sistema de medição e identificar a maneira correta de operar o sistema.

A etapa três, correspondente à seleção do padrão, é baseada em dados coletados na etapa anterior, onde consideram-se os seguintes requisitos, a incerteza expandida nas condições de calibração e a faixa de medição do sistema padrão (ALBERTAZZI; SOUZA, 2008).

A próxima etapa, onde será realizado o planejamento e a preparação do experimento abrange em especificar o aparato experimental, definir o procedimento de execução, preparar a coleta de dados e montar o experimento, que antecede a quinta etapa do processo, a execução da calibração. Essa etapa é onde os dados serão coletados através do procedimento especificado na etapa anterior. A etapa seis é então onde os dados são coletados, tratados e processados e então documentados, juntos com outras informações que necessitam ser registradas.

É na etapa seguinte então que os dados e gráficos já processados e documentados são analisados e comparados às especificações dos fabricantes, e finalmente, todos os resultados desses processos de calibração são expressos na forma de um relatório resumido, chamado de certificado de calibração, que contém todas informações relevantes sobre o procedimento de calibração realizado (ibid).

### 2.2.2 Densidade de Líquidos

A densidade pode ser definida conforme IBP (1984), pela quantidade de massa contida em uma unidade de volume, o que pode ser interpretado como a medida de concentração de determinados elementos em um espaço de volume, e calculada através de:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (4)$$

#### 2.2.2.1 Propriedades

Segundo o IBP (1984) a densidade pode ser considerada como absoluta ou relativa, sendo a absoluta a que conhecemos como densidade em si ou até mesmo massa específica. Já a densidade relativa representa a relação entre a densidade de um líquido qualquer comparado à densidade de outro, normalmente a água em temperatura ambiente, sendo esta uma grandeza adimensional.

Também conforme Tipler; Mosca (1933) e Brunetti (2005) é necessário levar em consideração que a densidade é um grandeza que varia de acordo com a temperatura. Por se tratar da concentração de uma certa substância em um determinado volume, quando há variação de temperatura, conseqüentemente ocorre variação de volume, o que interfere diretamente no valor da densidade. Quando a temperatura diminui, o volume também é reduzido e as moléculas são trazidas mais pra perto uma das outras, resultando num aumento de concentração de moléculas por volume, que resulta em um aumento de densidade. O mesmo vale para o aumento de temperatura, que dispersa os átomos entre si com o aumento de volume, reduzindo o valor da densidade. Isto pode ser descrito pela equação:

$$\frac{P \cdot V}{T} = \frac{P_o \cdot V_o}{T_o} \quad (5)$$

Considerando que a pressão sempre será constante, pode-se observar que quanto maior a temperatura, maior o volume ou quanto menor a temperatura, menor o volume, conseqüentemente, baseado na equação 5, sabendo-se que a massa é constante, pode-se constatar então que quanto maior a temperatura, menor a densidade e quanto menor a temperatura, maior a densidade.

#### 2.2.2.2 Unidades

O valor da densidade quando medido pode então ter diversas unidades diferentes dependendo da aplicação em que se encontre, e qual for a unidade mais conveniente para a situação, mesmo que algumas delas não façam parte do sistema internacional, como seus usos facilitam a práticas, elas são aceitas pelo SI. As unidades de densidade são então as seguintes: g/cm<sup>3</sup>, g/litro, kg/litro, kg/m<sup>3</sup>, ton/m<sup>3</sup>, lb/ft<sup>3</sup>, lb/gl. No entanto existem também as unidades de concentração, que também são bastante utilizadas, a escala Baumé, (*°Be*) geralmente utilizada nas indústrias química e petroquímica, a escala Brix, (*°Br*) muito utilizada na indústria açucareira, capaz de identificar a concentração de massa de sacarose por peso de água, a escala API, utilizada para produtos do petróleo entre outras (IBP, 1984).

#### 2.2.2.3 Aplicações de medição de densidade

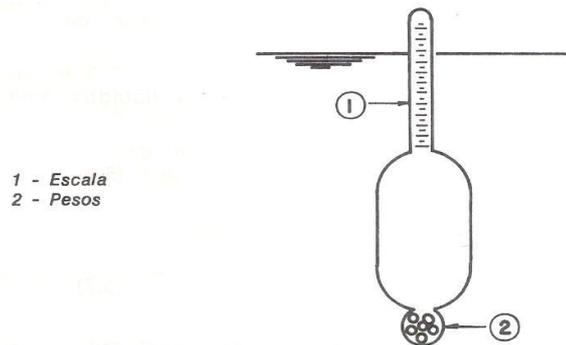
A medição de densidade pode ser utilizada para inúmeros fins diferentes, além da determinação da composição de líquidos. Ela pode ser utilizada para identificar contaminação em soluções, qualidade de produtos nas indústrias, parâmetros de controle para processos, diagnósticos médicos entre outros.

#### 2.2.3 Técnicas de medição de densidade de líquidos

Neste item serão descritas as diversas técnicas existentes para realizar a medição da densidade de líquidos.

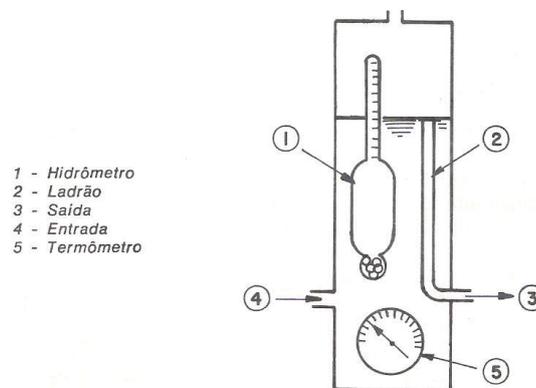
### 2.2.3.1 Hidrômetros e transmissores

Um hidrômetro, representado na Figura 9, também conhecido por densímetro, é um instrumento normalmente composto por uma haste de pequeno diâmetro e cápsula de vidro que contém um pequena quantidade de chumbo.



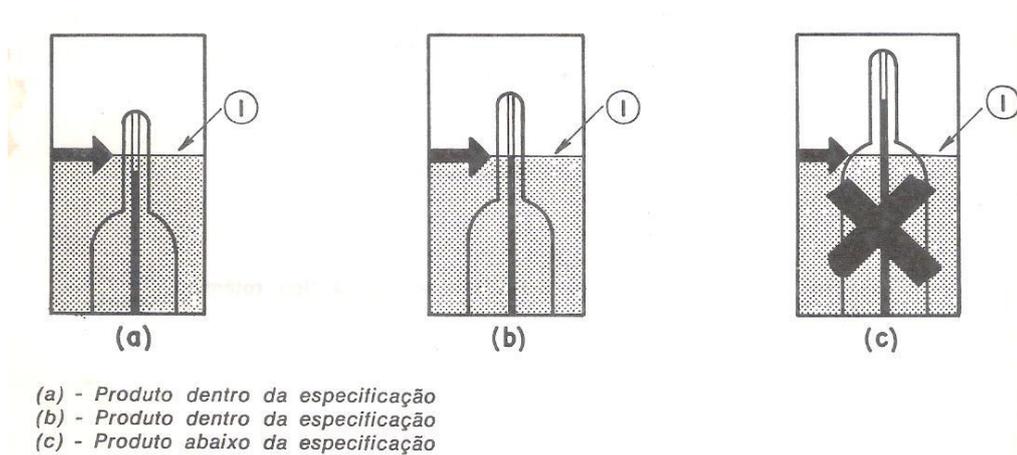
**Figura 9 - Hidrômetro**  
**Fonte- IBP (1984)**

Seu funcionamento básico consiste no princípio da flutuação, em que o densímetro flutuará de acordo com a densidade do líquido em que se encontra, e sua densidade será indicada pelo ponto da haste que está em contato com a superfície da substância. Normalmente estes hidrômetros são montados de maneira que permitam que o fluido se encontre em movimento por meio de vazão, porém mantendo o volume da amostra constante, como na Figura 10.



**Figura 10 - Hidrômetro de volume constante**  
**Fonte- IBP (1984)**

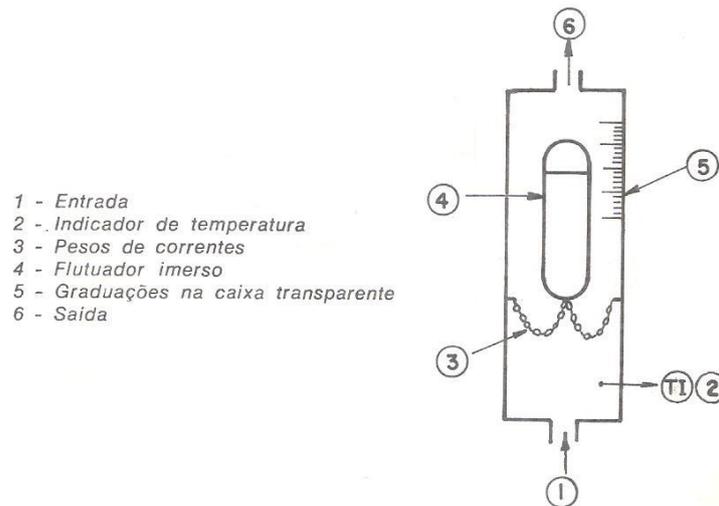
Também é importante destacar que existem alguns hidrômetros auto-compensados, capazes de corrigir a densidade do fluido para a temperatura indicada. Essa técnica basicamente consiste em demonstrar qual seria a densidade máxima para a temperatura em questão, como mostrado na Figura 11



**Figura 11 - Hidrômetro autocompensado**  
**Fonte – IBP (1984)**

### 2.2.3.2 Sensores tipo deslocamento

Este sistema é composto por uma cápsula flutuadora presa por correntes nas paredes do recipiente que irá conter o fluido, como pode ser ilustrado na Figura 12, e sua principal característica é que o deslocador fica submerso por completo. A leitura do valor de densidade é feita então por uma escala que se encontra na parede do recipiente, onde a indicação da densidade será feita pela marcação apresentada na superfície do deslocador.



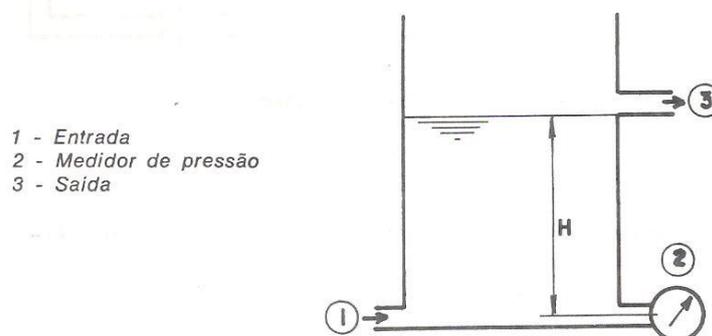
**Figura 12 - Escala de valor de densidade**  
 Fonte - IBP (1984)

### 2.2.3.3 Sensores tipo pressão hidrostática

Os sensores de medição de densidade por pressão hidrostática apresentam um princípio de funcionamento totalmente diferente dos mostrados anteriormente. Eles utilizam a pressão que uma coluna de líquido com altura fixa exerce, e consideram que esta pressão é proporcional a um valor de densidade:

$$P = G \cdot H \quad (6)$$

onde  $P$  é a pressão,  $G$  representa a densidade do fluido em relação à água e  $H$  a altura da coluna de água, representados na Figura 13.

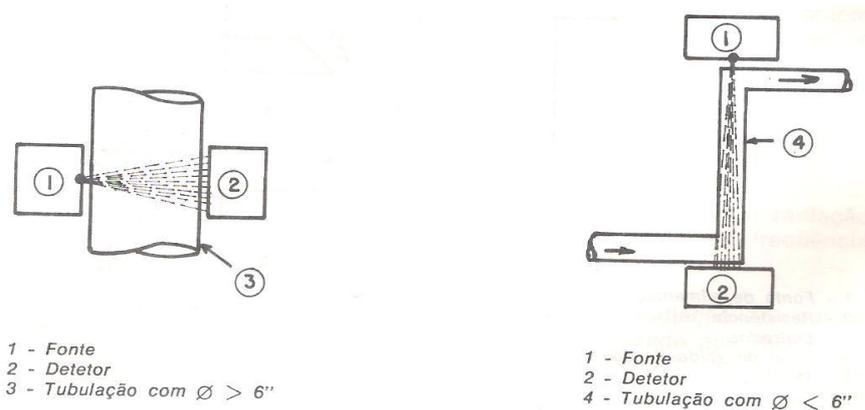


**Figura 13 - medidor de pressão**  
 Fonte - IBP (1984)

Sabendo-se então a altura da coluna de água, que de acordo com a montagem apresentada na Figura 13 é fixa, e o valor da pressão causada pela coluna de líquido, que será obtida pelo medido de pressão, é então possível calcular a densidade do líquido em relação à água (IBP, 1984).

#### 2.2.3.4 Sensores tipo radiação

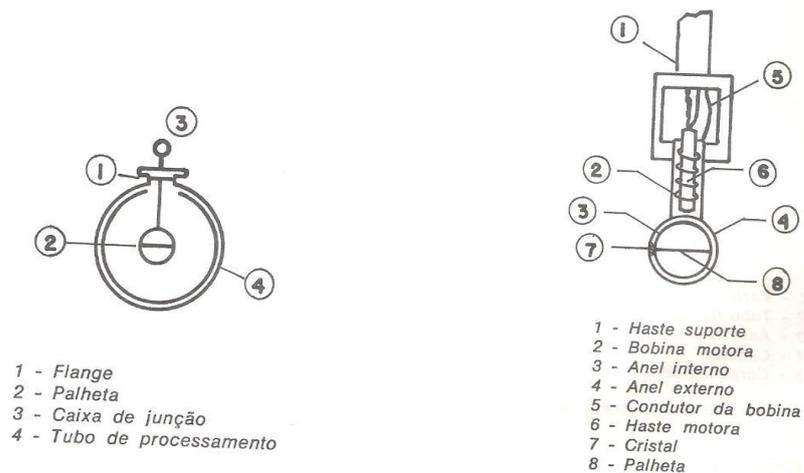
Este tipo de sensor apresenta uma característica única. Eles trabalham com isótopos radioativos, e seu parâmetro usado para indicar a densidade dos fluidos é a quantidade de radiação absorvida através de uma determinada amostra de líquido. Existem diversos tipos de densímetros radioativos diferentes, porém seus princípios de funcionamento são praticamente os mesmos, e as configurações básicas mais comuns são as demonstradas nas imagens da Figura 14.



**Figura 14 - Sensores de radiação**  
Fonte - IBP (1984)

#### 2.2.3.5 Sensores por vibração

Segundo IBP (1984), os sensores por vibração dependem de variações de sua frequência natural de oscilação com variações da densidade de líquido no processo de medição. Portanto, se for medida esta frequência de vibração, é possível medir a densidade de um fluido. Existem diversos modelos desse tipo de sensor, como por exemplo, o sensor por palheta vibratória, o sensor por carretel vibratório, o sensor por tubo vibratório, o sensor por tubo geminado, entre vários outros. Na Figura 15, é então possível visualizar como são os sensores por palheta vibratória (esquerda) e por carretel vibratório (direita).



**Figura 15 - sensores por vibração**  
**Fonte - IBP (1984)**

### 2.2.3.6 Refratometria

Essa técnica envolve princípios totalmente diferentes dos mencionados anteriormente. A refratometria é um método óptico utilizado para determinar a velocidade com a qual a luz se propaga por um meio, relacionando-a diretamente com a densidade, baseado no princípio da refração. Esta variação de velocidade que pode ser medida através do ângulo de refração pode ser então usada para se calcular o índice de refração e até mesmo a densidade do meio utilizado (UNED, 2013).

A velocidade varia com o meio porque a interação entre as moléculas nos diferentes meios varia, e isto faz com que a direção de propagação da luz seja alterada. A refratometria então trata-se nada mais que a identificação de medida do quanto a trajetória da luz é desviada com esta mudança de meio. É importante ressaltar que o parâmetro principal para avaliar este desvio é o índice de refração, que segundo Cirino et al. (2013), seu valor varia com a temperatura e com a quantidade de sólidos dissolvidos no fluido, ou seja, com a densidade do líquido.

Os aparelhos capazes de empregar esta técnica na medida de índice de refração ou densidade são chamados de refratômetros. Esse instrumento foi idealizado no final do século 18 por Ernst Abbe, composto por dois prismas de vidro, capaz de medir o índice de refração de duas maneiras, que foi aperfeiçoado e é usado até hoje tendo derivado diversos modelos de refratômetros, como mostrado na Figura 16.

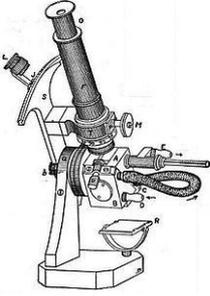
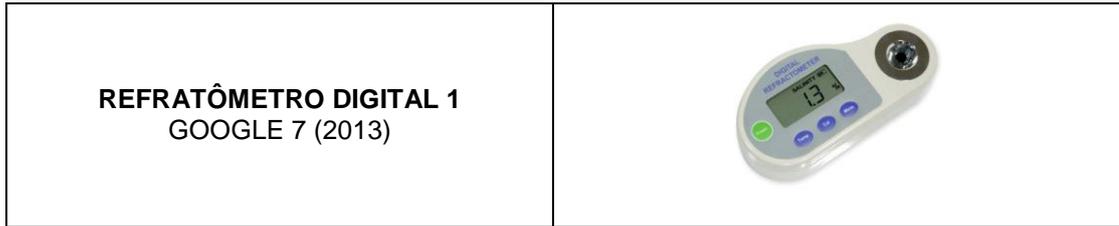
MODELO	IMAGEM
<p><b>REFRATÔMETRO DE ABBE ORIGINAL</b> GOOGLE 1 (2013)</p>	
<p><b>REFRATÔMETRO DE BANCADA</b> (BASEADO NO DE ABBE) GOOGLE 2 (2013)</p>	
<p><b>REFRATÔMETRO DE BANCADA 1</b> GOOGLE 3 (2013)</p>	

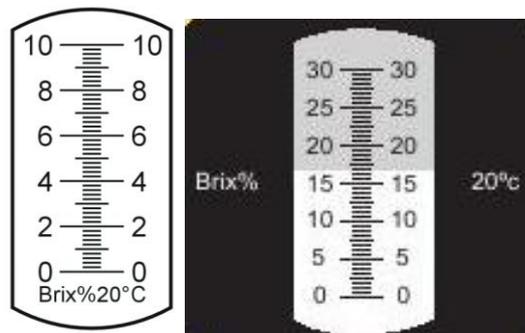
Figura 16 - Quadro De Modelos De Refratômetros ( Continua...)

<p><b>REFRATÔMETRO DE BANCADA 2</b> GOOGLE 4 (2013)</p>	
<p><b>REFRATÔMETRO PORTÁTIL</b> GOOGLE 5 (2013)</p>	
<p><b>REFRATÔMETRO DIGITAL</b> GOOGLE 6 (2013)</p>	



**Continuação da FIGURA 16 - Quadro De Modelos De Refratômetros**  
**FONTE - O autor (2013) adaptado de GOOGLE**

No refratômetros analógicos, através de uma escala pré-determinada, é possível então associar o desvio de luz a uma densidade através de uma escala, apresentada na Figura 17.



**Figura 17 - Escala de refratômetros analógicos**  
**Fonte - Adaptado de google (2013)**

A escala utilizada para representar a densidade na Figura 17 é a de graus Brix. Para fazer a leitura do valor indicado na escala é necessário ver a partir de qual ponto a escala é iluminada pelo feixe de luz. O valor de referência é representado pelo zero da escala, e normalmente este valor é calibrado para representar a água pura.

## 2.3 ÓPTICA

Este item comentará sobre a propagação da luz, reflexão, refração, cálculo de prismas e refratometria.

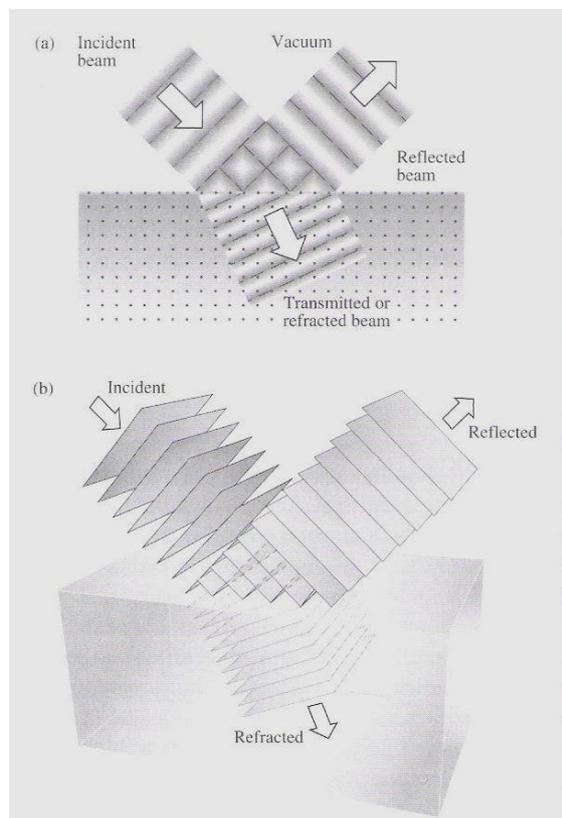
### 2.3.1 Propagação da luz

Tratando-se da propagação da luz pode-se considerar que ela apresenta característica de onda. Ocorre então neste processo um espalhamento lateral dos

raios de luz que através de um fenômeno chamado interferência faz com que este raio construtivamente se propague numa direção frontal. Esse tipo de espalhamento acontece quando a luz entra em contato com meios mais densos que o atual, A transmissão de luz por um meio homogêneo, trata-se de um processo de espalhamento recorrente, onde vários eventos podem contribuir para a mudança de fase ou qualquer outra característica da luz, que possa interferir em sua propagação. Normalmente quando este fator interfere na fase da propagação pode-se dizer que corresponde ao índice de refração do meio (HECHT, 1931).

### 2.3.2. Reflexão

Segundo Pedrotti (1932), quando ocorre uma mudança de meio, a componente do raio de luz que permanece no mesmo meio do raio incidente, corresponde ao fenômeno da reflexão. A reflexão pode ser classificada em interna e externa, de acordo com o índice de refração do meio incidente e do transmissor (Figura 18 ).



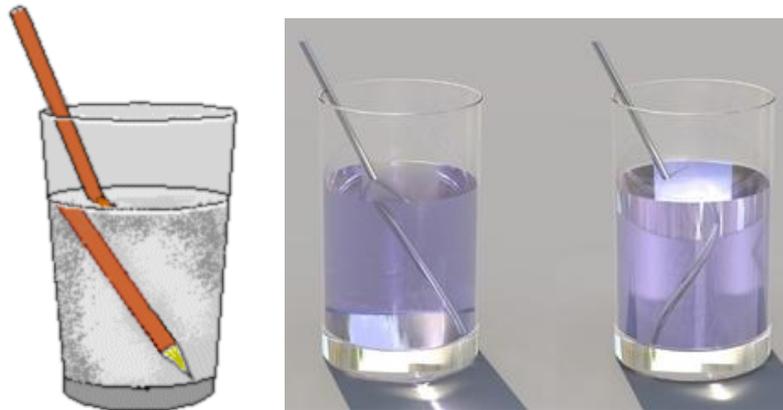
**Figura 18 - Refração do meio incidente e transmissor**  
**Fonte - Pedrotti (1932)**

A lei da reflexão mostra que o ângulo de reflexão sempre será igual ao ângulo de incidência, porém na direção refletida, descrevendo este fenômeno com:

$$\theta_i = \theta_r \quad (7)$$

### 2.3.3 Refração

Quando um objeto é submerso parcialmente na água tem-se a impressão que ocorre um leve dobramento em sua estrutura, fenômeno que é conhecido por refração (FIGURA 19). Quando um raio de luz muda de meio as características deste meio interferem nos parâmetros de onda da luz, que resulta na mudança de direção de sua propagação. Isto acontece porque a velocidade com que a luz se propaga no novo meio é diferente da velocidade em que ela se propagava previamente (HECHT, 1931).

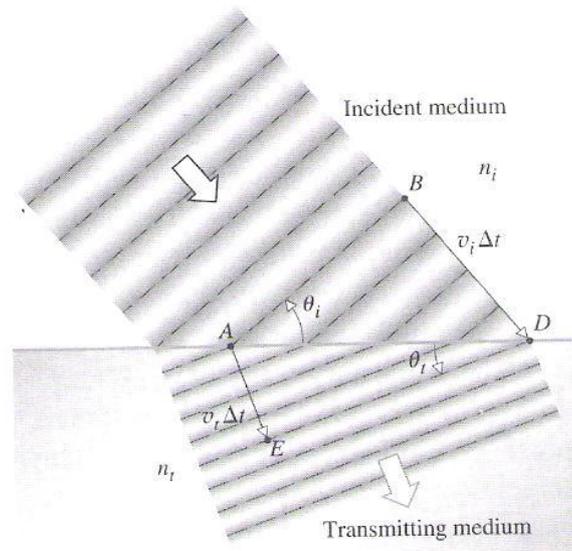


**Figura 19 - Dobramento da água**  
Fonte - Engenharia da cerveja (2013)

Comparando então esta velocidade do meio à velocidade da luz no vácuo, podemos encontrar o descrito anteriormente, índice de refração de um meio, através da seguinte equação:

$$n = \frac{c}{v} \quad (8)$$

onde  $n$  é o índice de refração,  $c$  é a velocidade de luz no vácuo e  $v$  a velocidade da luz no meio (FIGURA 20).



**Figura 20- Índice de refração**  
**Fonte - Hecht (1931)**

Este fenômeno foi estudado por Willebrord Snel van Royen, que contribuiu para a estruturação da lei da refração. A primeira parte desta lei refere-se à equação de Snell que é capaz de identificar as características do raio refratado com relação ao raio incidente, considerando o ângulo de incidência do feixe no meio desejado, o índice de refração do meio incidente, o ângulo com o qual o raio é refratado e o índice de refração do meio transmissor:

$$\frac{\text{sen}\theta_i}{v_i} = \frac{\text{sen}\theta_t}{v_t} \quad (9)$$

$$n_i \text{sen}\theta_i = n_t \text{sen}\theta_t \quad (10)$$

É então possível descrever o índice de refração relativo entre dois meios através da seguinte adaptação da lei de Snell:

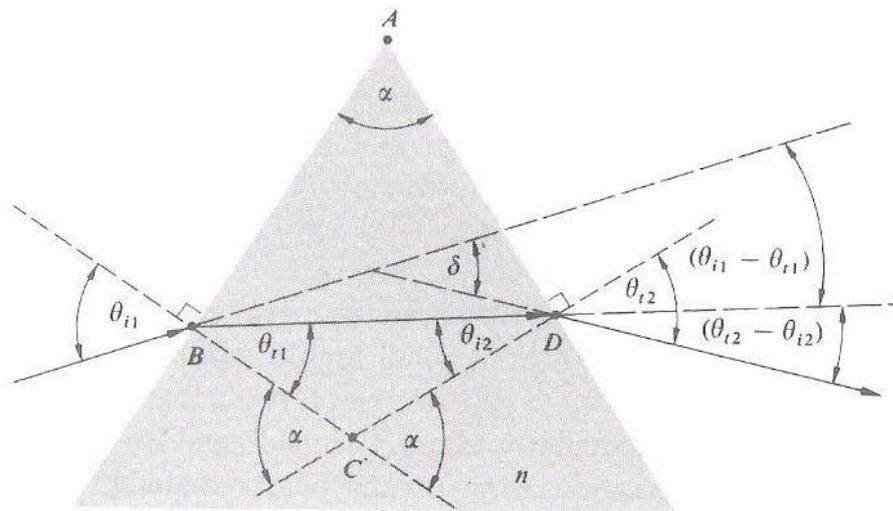
$$\frac{\text{sen}\theta_i}{\text{sen}\theta_t} = n_{ii} \quad (11)$$

#### 2.3.4 Cálculo de geometria de prismas

A Óptica Geométrica é um domínio idealizado de maneira simples e aproximada com grande eficiência, considerando que em meios homogêneos o fenômeno da difração tem sua significância bastante reduzida.

Neste domínio, considera-se que os raios de luz se propagam por meios homogêneos, podendo transacionar de meios, através de superfícies. Muitas vezes essas superfícies podem se encontrar como parte de instrumentos ópticos, como por exemplo, lentes e prismas. As lentes são instrumentos ópticos refrativos, capazes de manipular a distribuição de energia transmitida, podendo espalhar ou concentrar os raios de luz. Já os prismas têm aplicações diferentes, podendo ser usados através de combinações ou não, na construção de instrumentos ópticos com diversas aplicações, como interferômetros, dispositivos polarizadores, separador de raios de luz, entre outros. Existem dois tipos principais de prismas, os prismas refletivos e os dispersivos.

Os prismas de dispersão tem a característica de mudar a direção de propagação de um raio que passa por eles, através de deflexões, causada pelo ângulo de desvio  $\delta$ . Através da Figura 21 é possível explicar e exemplificar os fenômenos relacionados à este tipo de prisma (HECHT, 1931).



**Figura 21 - prisma de dispersão**  
**Fonte - hecht (1931)**

O feixe passa por duas refrações, nos ponto B e no ponto D, estas representadas pela diferença entre os ângulos de incidência e de transmissão nos pontos indicados ( $\theta_i - \theta_t$ ). O desvio total é então dado pela seguinte equação:

$$\delta = (\theta_{i1} - \theta_{t1}) + (\theta_{i2} - \theta_{t2}) \quad (12)$$

$$\alpha = \theta_{t1} + \theta_{t2} \quad (13)$$

$$\delta = \theta_{i1} + \theta_{i2} - \alpha \quad (14)$$

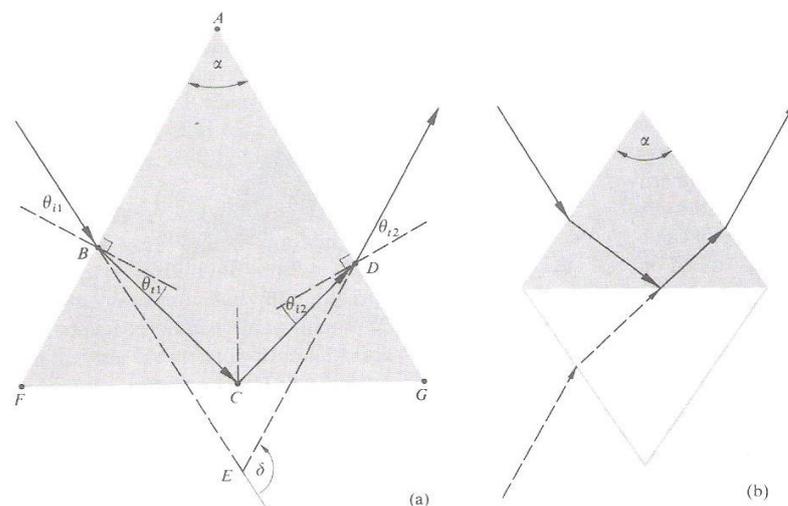
Se esta equação for expandida através da substituição de seus componentes trigonométricos pela lei de Snell, é possível identificar que o ângulo de desvio aumenta de acordo com o índice de refração do meio que compõem o prisma, o que significa que o desvio também é influenciado pelo comprimento de onda  $\lambda$  da luz.

Assume-se então que existe um valor chamado ângulo de desvio mínimo que pode ser encontrado na prática, e pode-se através disso chegar na seguinte equação:

$$n = \frac{\text{sen}[(\delta_m + \alpha)/2]}{\text{sen}(\alpha/2)} \quad (15)$$

a partir da qual estrutura-se umas das técnicas mais precisas para a determinação do índice de refração para substâncias transparentes.

Existem também os prismas de reflexão (FIGURA 22), onde a dispersão não é desejada, e sim que o desvio do raio ocorra devido à pelo menos uma reflexão interna, que será responsável pela mudança de direção de propagação ou orientação da imagem, como demonstrado na Figura a seguir :



**Figura 22 - Prisma de reflexão**  
Fonte - Hecht (1931)

No entanto existe outro instrumento óptico que é importante ressaltar ainda nesta sessão, a fibra óptica. Ela foi desenvolvida através do conceito de canalização da luz através de um longo dielétrico, e conduz a luz através de reflexões, preservando a informações contidas no feixe de entrada.

### 2.3.5 Refratometria

Como descrito no capítulo anterior, a refratometria trata-se da técnica responsável por determinar a densidade ou concentração de uma solução através da mudança de velocidade de propagação da luz entre dois meios.

Essa associação é possível, pois a mudança de velocidade devida ao meio resulta no desvio de direção do feixe de luz, que possibilita o cálculo do índice de refração. Pode-se então associar o valor deste parâmetro encontrado, com a densidade do meio, considerando que estes tem uma relação, porém não necessariamente conhecida, as vezes linear, as vezes não, sempre dependendo de qual substância se trata.

Também é importante ressaltar que tanto o índice de refração quanto a densidade variam de acordo com a temperatura, porém não é possível relacionar estes três parâmetros através de uma equação. Isso se dá devido a característica molecular dos meios, que podem ser completamente diferentes umas das outras e variam não só com a temperatura, mas também com as substâncias que compõem o fluido e a interação de suas moléculas, e como a mudança de velocidade se dá à nível molecular, cada substância diferente pode resultar em um efeito diferente no resultado final da velocidade de propagação do feixe luminoso, e portanto na sua direção. No entanto, Wixwat e Stevens (1990) concluíram que o comportamento da densidade e do índice de refração ocorrem de maneira similar com a variação de temperatura, e paralelamente a isto, Zafarani-Moattar e Majdan-Cegincara (2007) demonstram em seu trabalho que é possível obter tal relação através da experimentação, buscando os valores equivalentes do índice de refração e da densidade para determinadas concentrações de diversas substâncias a fim de identificar seu comportamento. Para relacionar estas variáveis é necessário criar uma Tabela empírica experimental através do levantamento de dados com realização de práticas para verificar qual a densidade e o índice de refração de uma

amostra com concentração conhecida, em temperatura constante e monitorada. No entanto é necessário validar os resultados obtidos e tentar identificar o comportamento dos dados, tentando encontrar uma linearidade no sistema, lembrando que erros podem acontecer por inúmeros motivos, mas podem ser corrigidos com uma calibração constante no instrumento de medição ou até mesmo tentando utilizar técnicas de compensação no sistema (HANCKE, 2002).

Porém é importante também entender o funcionamento óptico por trás deste instrumento, e não somente como ele faz para associar o índice de refração medido a uma densidade. O refratômetro sempre utiliza a ajuda de instrumentos ópticos como prismas ou fibra ópticos, para ser capaz de obter o desvio realizado por um meio. O seu funcionamento baseia-se na medição do ângulo limite numa reflexão total, designado por ângulo crítico. Este é o ângulo de refração característico de um dado meio, quando o raio de luz incidente efetua um ângulo de  $90^\circ$  com a normal à superfície de separação entre os dois meios.

Como citado anteriormente, um refratômetro muito utilizado é o de Abbe, composto por uma fonte luminosa e por um conjunto de prismas que compensam a dispersão da luz realizada pela amostra e pelo sistema ótico, de modo a que o índice de refração apareça referenciado em uma escala do sódio.

Entretanto, é possível fazer uma montagem mais simples, com apenas um prisma, que também permita a identificação da densidade. Normalmente esta identificação do valor indicado pelo sistema depende diretamente do sistema ocular humano, porém existem técnicas mais modernas, nas quais o valor do índice de refração pode ser indicado automaticamente, como por exemplo, a utilização de um sensor de um vetor de foto-diodos no local de incidência dos feixes de luz refratados por um objeto com características prismáticas contendo amostra do meio que deseja-se medir a densidade (TURAN et al, 2001).

### 3 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo será apresentado o desenvolvimento do projeto proposto e as técnicas e procedimentos realizados em sua execução, de acordo com a estruturação do projeto, que pode ser exemplificado através do diagrama de blocos na Figura 23.

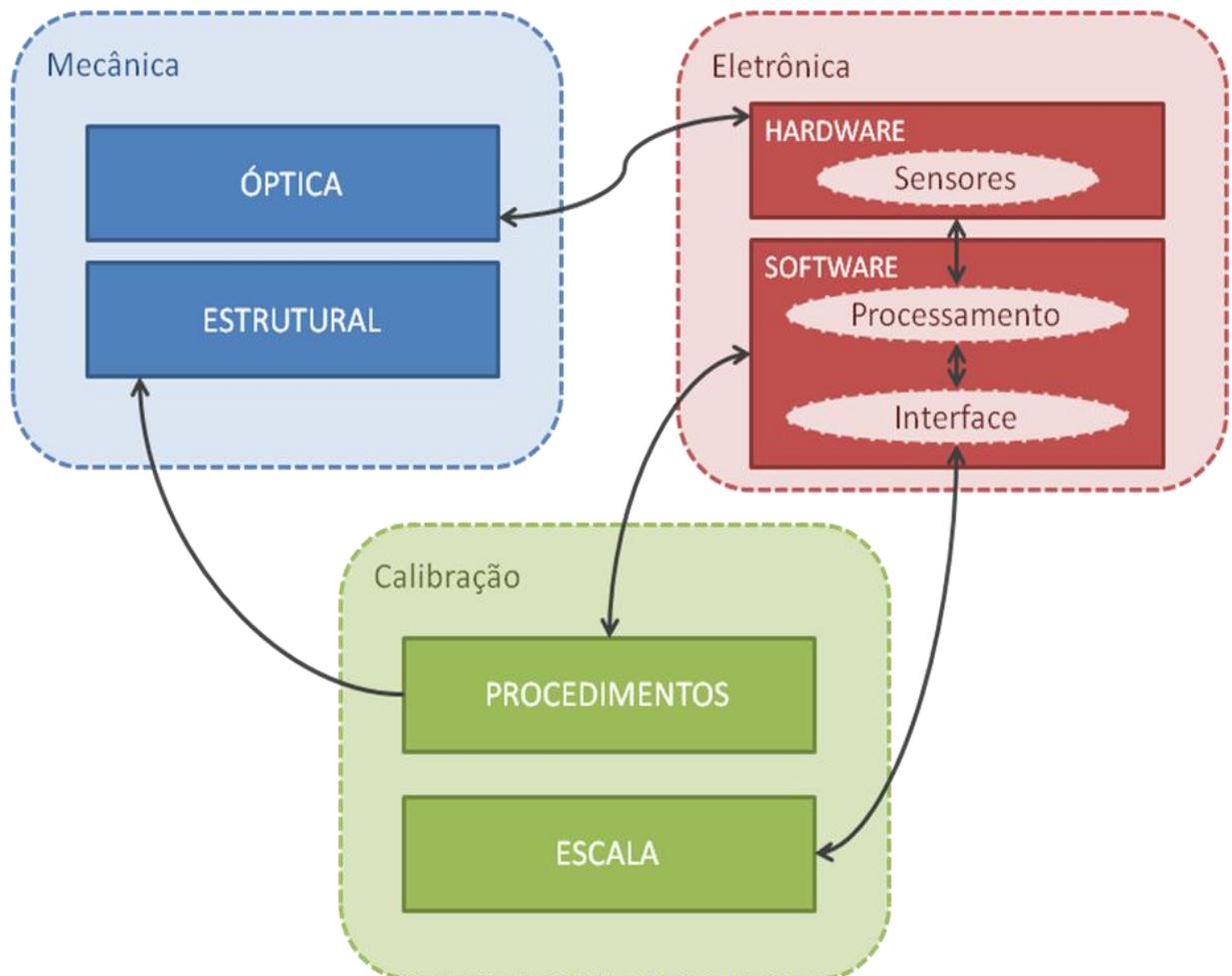


Figura 23 - Diagrama de blocos do projeto  
Fonte - O autor (2013)

#### 3.1 ELETRÔNICA

A parte eletrônica do sistema desenvolvido é constituída basicamente por dois módulos, um de *software* e um de *hardware*.

### 3.1.1 Hardware

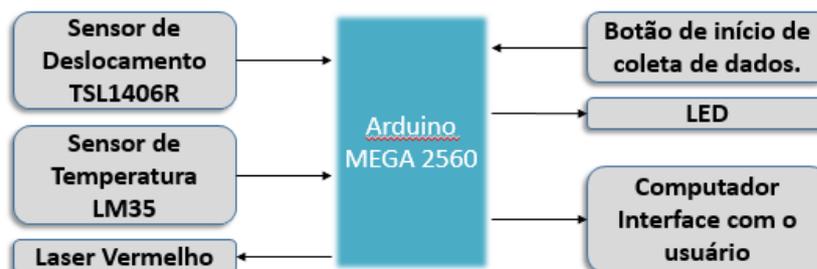
Compõem o *hardware* do sistema desenvolvido, o micro-controlador, a fonte luminosa e os sensores utilizados.

Como microcontrolador utilizou-se um Arduino MEGA, o mesmo da Figura 24, que possui comunicação USB com o computador e uma quantidade ideal de pinos de I/O.

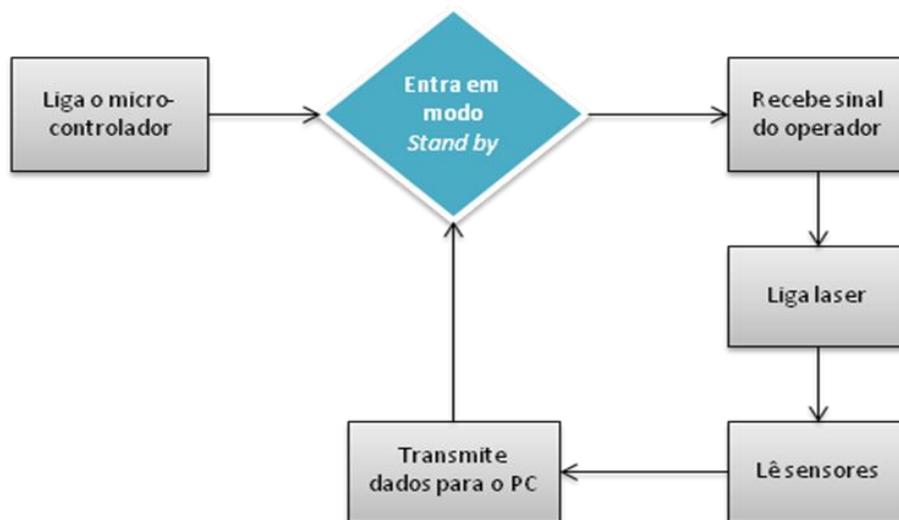


**Figura 24 - Microcontrolador usado no projeto - ARDUINO MEGA**  
Fonte- O autor (2013)

As funções deste no projeto desenvolvido foram controlar a emissão de luz vinda da fonte luminosa, captar os dados obtidos pelos sensores, e integrar o sistema de *hardware* com a interface ao usuário, comunicando os dados para o computador e interagindo com o usuário através de um botão e um LED. O diagrama de blocos do controlador dentro do sistema é ilustrado na Figura 25, e seu fluxograma de funcionamento na Figura 26.



**Figura 25 - Diagrama de blocos do micro-controlador no sistema**  
Fonte - O autor (2013)



**Figura 26 - Fluxograma de funcionamento do micro-controlador**

Fonte – O autor (2013)

Outro componente da parte de *hardware* do projeto é a fonte emissora de luz, que foi composta por um módulo *laser* de cor vermelha. O laser foi ligado em série com um resistor de 200kΩ para limitar sua corrente de alimentação e evitar algum dano ao módulo, e também para diminuir sua intensidade luminosa, para que quando a luz deste fosse projetada no sensor de foto-diodos seu feixe não se espalhasse muito e iluminasse a menor quantidade de pixels possível. O acionamento deste módulo, como citado, é realizado pelo microcontrolador, e na Figura 27 é possível visualizar, o módulo laser utilizado e sua montagem no projeto.



**Figura 27- Módulo laser utilizado com fonte luminosa do sistema**  
Fonte- O autor (2013)

A terceira parte então é a diretamente ligada à medição, pois é composta pelos sensores do projeto. O sistema possui dois tipos de sensores, um sensor de temperatura e um de deslocamento. O sensor de temperatura é composto por um LM35, responsável por monitorar qual a temperatura do sistema. No entanto, o sensor de deslocamento apresenta uma estrutura mais complexa. Ele é um vetor de foto-diodos, modelo TSL1406R da TAOS mostrado na Figura 28, composto por 768 células, que identifica quais de seus pixels estão iluminados, e envia de forma serial esta informação para o controlador.



**Figura 28 - Vetor de foto-diodos 768 pixels modelo tsl1406r da TAOS  
Fonte - O Autor (2013)**

Para facilitar a atividade do operador, o *hardware* do projeto também possui um botão e um *led*, que compõem parte da interface com o usuário.

### 3.1.2 Software

Pode-se dizer que o *software* desenvolvido se encontra subdividido em três partes principais: *firmware*, processamento de dados e interface com o usuário. O *firmware* foi desenvolvido em linguagem C e os outros módulos em linguagem C#.

### 3.1.2.1 *Firmware*

O *firmware* é a parte de *software* desenvolvida para o micro-controlador. É através dele que as ações tomadas pelo controlador são geradas. No projeto desenvolvido o *firmware* contém diferentes funções que representam essas ações.

As principais funções presentes no código são a de *setup*, a de acionamento do laser, a de leitura do sensor de foto-diodos, a de leitura do sensor de temperatura e a de envio de dados serial.

A função de *setup* inicializa as variáveis necessárias para o funcionamento do código, os pinos, as interrupções, alguns outros parâmetros, e inicializa a transmissão serial do Arduino. O acionamento do laser é feito de maneira bem simples, tem sua alimentação através de um único pino, e liga e desliga de acordo com as interrupções de leitura do sensor de deslocamento.

A função de leitura do sensor de deslocamento é comandada por duas interrupções, a primeira responsável pelo início da captação de dados, gerada por um sinal externo dado pelo operador, e a segunda responsável pelo fim da leitura de dados, acionada por um sinal provido pelo sensor quando o ultimo *pixel* é lido. A leitura deste sensor é realizada de maneira síncrona, lendo serialmente *pixel* por *pixel* da posição 1 até a posição 768, que retorna um valor inteiro entre 0 e 1023, correspondente à intensidade luminosa do *pixel*, onde zero é totalmente iluminado e 1023 representa a ausência de luz.

A leitura do sensor de temperatura é realizada continuamente. A complexidade deste sensor é bem menor, apenas convertendo o valor de tensão enviado à um pino de *I/O* para a temperatura equivalente.

Por fim, a função de transmissão serial, já inicializada, envia os dados obtidos na leitura dos sensores para o computador, onde os dados serão tratados pelo módulo de processamento desenvolvido.

### 3.1.2.2 Processamento de dados

O módulo de processamento de dados foi desenvolvido em linguagem C#, no mesmo software onde também se encontra a interface com o usuário. A função principal deste é processar os dados recebidos do sistema micro-controlado e convertê-los em informações válidas para o projeto, através de cálculos e análise de

resultados. A essência deste módulo, é que a maioria de seus métodos são responsáveis pela realização de cálculos.

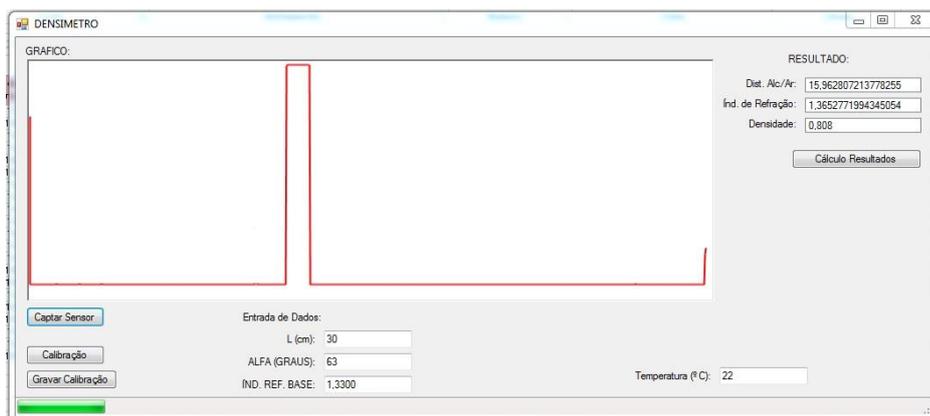
Existem neste módulo os métodos para calcular a posição em que o pixel incidiu no sensor de deslocamento, o valor de calibração, a distância entre dois pontos do sensor, para processar os dados recebidos do sensor e deixá-los em formato para visualização, para calcular o índice de refração e para associar o índice de refração à uma densidade.

Todos os dados gerados pelo módulo de processamento são então enviados ao módulo de interface, que indicará todos os valores desejados ao usuário do instrumento.

### 3.1.2.3 Interface

Esta parte do *software* é a responsável por interligar o usuário do aparelho ao sistema. Através dela é possível receber os dados capturados e tratados pelo instrumento, sem ter que depender da interpretação do operador sobre uma escala.

A interface é composta por formulários gráficos disponibilizados pela plataforma de desenvolvimento Visual Studio, na qual foram colocados componentes como botões, caixa de textos e outros para dar forma à um aplicativo de uso fácil e agradável ao operador (Figura 29).

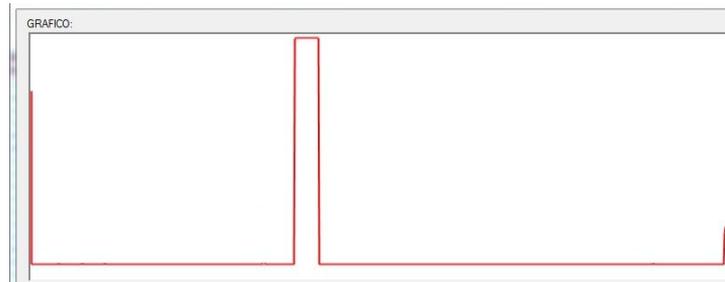


**Figura 29 - Interface**  
**Fonte- O autor (2013)**

Os botões são os responsáveis por acionar algum método, seja ele para enviar algum sinal ao micro-controlador, ou atualizar algum valor na tela. Os resultados calculados pelo módulo de processamento são expostos em caixas de

textos não editáveis. No entanto algumas caixas de texto também servem como campos para entrada de parâmetros necessários para o sistema.

A interface também possui um objetivo que traça em forma de gráfico, os pontos capturados pelo sensor, assim é possível visualizar se o valor está sendo capturado de maneira correta, como mostra a Figura 30, pois às vezes alguma variável externa pode interferir, e isto ajudar a investigar e solucionar o problema e traçar na tela os valores obtidos.



**Figura 30 - Gráfico da captura do sensor**  
**Fonte- O autor (2013)**

Então com esta interface, é possível fazer com que o usuário interaja com o sistema e tenha acesso aos dados capturados e calculados por ele.

## 3.2 MECÂNICA

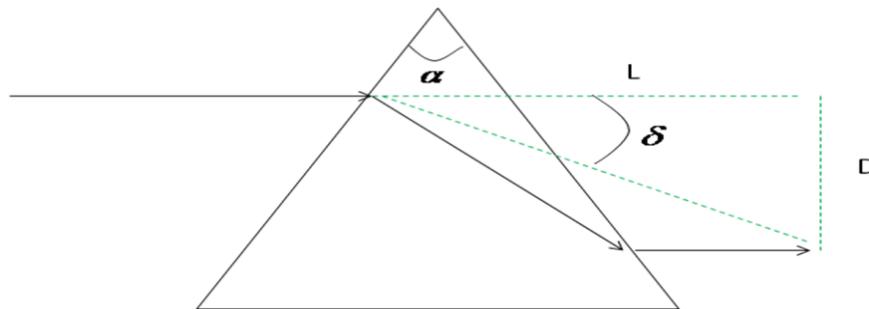
O projeto mecânico deste trabalho consistiu em enquadrar todos parâmetros ópticos e físicos que envolviam o sistema em um conjunto de estruturas capaz de atender o requisitos do projeto e eliminar ao máximo a influência de variáveis externas que poderiam afetar o desempenho do resultado final.

### 3.2.1 Geometria Óptica

Para atingir um ângulo de desvio capaz de proporcionar ao sistema projetado uma resolução ideal, foi necessário trabalhar com o fenômeno da refração empregando o uso de prismas. Considerando a lei de Snell e as outras equações detalhadas no capítulo anterior, é possível relacionar o ângulo de desvio, com a angulação principal do prisma e o índice de refração através da fórmula,

$$n = \frac{\text{sen}[(\delta_m + \alpha)/2]}{\text{sen}(\alpha/2)} \quad (16)$$

Porém, na prática o valor de desvio não é medido diretamente, e sim calculado através da distância de desvio, como ilustrado na Figura 31.



**Figura 31 – Cálculo do desvio**  
Fonte – O autor (2013)

Considerando as relações trigonométricas, pode-se substituir o ângulo de desvio pelo arco-tangente da relação D/L.

Portanto, considerando que a distância de desvio entre o maior valor de densidade e o menor valor de densidade é o principal requisito do projeto, pois deve abranger o maior comprimento D possível dentro das limitações e dimensões do sensor, foi criada uma planilha capaz estimar os diversos valores possíveis para este comprimento, considerando fixos os índices de refração para a água e o álcool (respectivamente 1,33 e 1,36) e variando os parâmetros  $\alpha$  e L. Para tornar possível este cálculo, a equação mostrada anteriormente teve que ser adaptada, primeiramente deixando a equação em função do ângulo de desvio,

$$\text{sen}[(\delta + \alpha)/2] = n \cdot \text{sen}(\alpha/2) \quad (17)$$

$$\frac{(\delta + \alpha)}{2} = \text{asen}[n \cdot \text{sen}(\alpha/2)] \quad (18)$$

$$\delta = 2 \cdot \text{asen}[n \cdot \text{sen}(\alpha/2)] - \alpha \quad (19)$$

Com a equação em função de  $\delta$ , substitui-se então o ângulo de desvio pela relação entre D e L, e encontra-se a equação correspondente à distancia de desvio do feixe de luz:

$$\delta = a \tan\left(\frac{D}{L}\right) \quad (20)$$

$$D = L \cdot \tan(\delta) \quad (21)$$

$$D = L \cdot \tan(2 \cdot \text{asen}[n \cdot \text{sen}(\alpha / 2)] - \alpha) \quad (22)$$

Entretanto essa distância é relativa entre o ar e o meio escolhido, porém para comparar a distância entre dois meios que sejam diferentes do ar, para então encaixar os parâmetros dentro do requisito do sistema, calcula-se a distância de desvio para os dois meios diferentes, e realiza-se um subtração, que fornece o valor da distancia de desvio relativa entre 2 meios diferente entre si e do ar, sendo

$$D_{rel} = D_{meio1} - D_{meio2} \quad (23)$$

### 3.3.2 Estrutura Mecânica

Considerando-se a planilha descrita no item anterior e a real dimensão da faixa de foto-diodos, foram estipulados diversos valores para alfa e L para então começar a projetar como deveria ser a estrutura mecânica do sistema e suas dimensões. Considerando que o D desejado é em torno de 4cm, os parâmetros foram variados, obtendo os seguinte resultados (Figura 32; Tabelas 3; 4; 5 e 6).

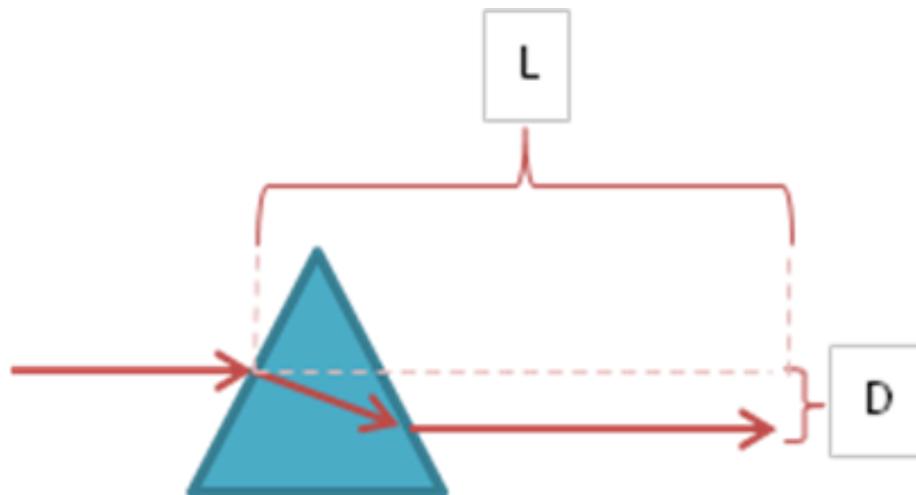


Figura 32 - Valores para projetar  
Fonte- O autor (2013)

Tabela 3 - Valores Para L = 5cm

ALPHAS	D_ag (cm)	ANG_R_ag (RAD)	ANG_R_ag (GRAUS)	D_alc (cm)	ANG_R_alc (RAD)	ANG_R_alc (GRAUS)	DELTA_D (D_alc - D_ag)
90	6,01295912	0,877118921	50,25521232	8,0541865	1,015226432	58,1681898	2,041227372
85	4,65154532	0,749310326	42,93231924	5,6521339	0,846542814	48,50333042	1,00058859
80	3,83650173	0,6544817	37,49903918	4,486052	0,73127175	41,89878494	0,649550301
75	3,26244753	0,578123322	33,12402638	3,7364523	0,641764741	36,77041111	0,474004731
70	2,82119339	0,513709255	29,43337222	3,1893845	0,567805567	32,53286258	0,368191111
65	2,46271658	0,457664488	26,22224358	2,7595596	0,504309918	28,89482984	0,296843063
63	2,33602088	0,437068454	25,04217776	2,6102922	0,481138231	27,56719002	0,2742713
62	2,27560883	0,427105017	24,4713149	2,5395558	0,469956492	26,92652354	0,26394699
60	2,16003172	0,407790085	23,36465079	2,4049712	0,448327718	25,68728609	0,244939444
55	1,89700872	0,362624137	20,77683262	2,1020341	0,397973763	22,80221697	0,205025406
50	1,66326399	0,321137947	18,39984902	1,8362511	0,351959087	20,16577023	0,172987078
45	1,45172158	0,282574998	16,1903548	1,5980896	0,30935632	17,72481151	0,146368037
40	1,25733277	0,246358473	14,11530075	1,3809409	0,269470515	15,43952322	0,123608119
35	1,07635262	0,212034717	12,14869442	1,1800175	0,231762735	13,27902656	0,103664907
30	0,90590623	0,179236878	10,26951662	0,9917171	0,195802192	11,21863924	0,085810887
25	0,74371548	0,147660475	8,460322045	0,8132334	0,161234799	9,238073493	0,069517876
20	0,58791901	0,11704635	6,706261857	0,6423066	0,127761605	7,320200767	0,054387627

Fonte- O Autor (2013)

Tabela 4 - Valores Para L = 10cm

ALPHAS	D_ag (cm)	ANG_R_ag (RAD)	ANG_R_ag (GRAUS)	D_alc (cm)	ANG_R_alc (RAD)	ANG_R_alc (GRAUS)	DELTA_D (D_alc - D_ag)
90	12,0259182	0,877118921	50,25521232	16,108373	1,015226432	58,1681898	4,082454745
85	9,30309065	0,749310326	42,93231924	11,304268	0,846542814	48,50333042	2,00117718
80	7,67300345	0,6544817	37,49903918	8,9721041	0,73127175	41,89878494	1,299100601
75	6,52489505	0,578123322	33,12402638	7,4729045	0,641764741	36,77041111	0,948009462
70	5,64238678	0,513709255	29,43337222	6,378769	0,567805567	32,53286258	0,736382223
65	4,92543316	0,457664488	26,22224358	5,5191193	0,504309918	28,89482984	0,593686126
63	4,67204175	0,437068454	25,04217776	5,2205844	0,481138231	27,56719002	0,5485426
62	4,55121766	0,427105017	24,4713149	5,0791116	0,469956492	26,92652354	0,52789398
60	4,32006344	0,407790085	23,36465079	4,8099423	0,448327718	25,68728609	0,489878888
55	3,79401743	0,362624137	20,77683262	4,2040682	0,397973763	22,80221697	0,410050812
50	3,32652798	0,321137947	18,39984902	3,6725021	0,351959087	20,16577023	0,345974156
45	2,90344316	0,282574998	16,1903548	3,1961792	0,30935632	17,72481151	0,292736074
40	2,51466555	0,246358473	14,11530075	2,7618818	0,269470515	15,43952322	0,247216238
35	2,15270524	0,212034717	12,14869442	2,3600351	0,231762735	13,27902656	0,207329813
30	1,81181247	0,179236878	10,26951662	1,9834342	0,195802192	11,21863924	0,171621774
25	1,48743096	0,147660475	8,460322045	1,6264667	0,161234799	9,238073493	0,139035753
20	1,17583801	0,11704635	6,706261857	1,2846133	0,127761605	7,320200767	0,108775253

Fonte - O Autor (2008)

Tabela 5 - Valores Para L = 20cm

ALPHAS	D_ag (cm)	ANG_R_ag (RAD)	ANG_R_ag (GRAUS)	D_alc (cm)	ANG_R_alc (RAD)	ANG_R_alc (GRAUS)	DELTA_D (D_alc - D_ag)
90	24,0518365	0,877118921	50,25521232	32,216746	1,015226432	58,1681898	8,16490949
85	18,6061813	0,749310326	42,93231924	22,608536	0,846542814	48,50333042	4,00235436
80	15,3460069	0,6544817	37,49903918	17,944208	0,73127175	41,89878494	2,598201202
75	13,0497901	0,578123322	33,12402638	14,945809	0,641764741	36,77041111	1,896018923
70	11,2847736	0,513709255	29,43337222	12,757538	0,567805567	32,53286258	1,472764445
65	9,85086633	0,457664488	26,22224358	11,038239	0,504309918	28,89482984	1,187372252
63	9,34408351	0,437068454	25,04217776	10,441169	0,481138231	27,56719002	1,097085199
62	9,10243532	0,427105017	24,4713149	10,158223	0,469956492	26,92652354	1,055787959
60	8,64012688	0,407790085	23,36465079	9,6198847	0,448327718	25,68728609	0,979757776
55	7,58803487	0,362624137	20,77683262	8,4081365	0,397973763	22,80221697	0,820101625
50	6,65305595	0,321137947	18,39984902	7,3450043	0,351959087	20,16577023	0,691948312
45	5,80688632	0,282574998	16,1903548	6,3923585	0,30935632	17,72481151	0,585472148
40	5,0293311	0,246358473	14,11530075	5,5237636	0,269470515	15,43952322	0,494432475
35	4,30541049	0,212034717	12,14869442	4,7200701	0,231762735	13,27902656	0,414659627
30	3,62362494	0,179236878	10,26951662	3,9668685	0,195802192	11,21863924	0,343243549
25	2,97486192	0,147660475	8,460322045	3,2529334	0,161234799	9,238073493	0,278071505
20	2,35167602	0,11704635	6,706261857	2,5692265	0,127761605	7,320200767	0,217550506

Fonte - O Autor (2008)

Tabela 6 - Valores Para L = 30 Cm

ALPHAS	D ag (cm)	ANG. R ag (RAD)	ANG. R ag (GRAUS)	D alc (cm)	ANG. R alc (RAD)	ANG. R alc (GRAUS)	DELTA_D (D_alc - D_ag)
90	36,0777547	0,877118921	50,25521232	48,325119	1,015226432	58,1681898	12,24736423
85	27,9092719	0,749310326	42,93231924	33,912803	0,846542814	48,50333042	6,003531539
80	23,0190104	0,6544817	37,49903918	26,916312	0,73127175	41,89878494	3,897301804
75	19,5746852	0,578123322	33,12402638	22,418714	0,641764741	36,77041111	2,844028385
70	16,9271603	0,513709255	29,43337222	19,136307	0,567805567	32,53286258	2,209146668
65	14,7762995	0,457664488	26,22224358	16,557358	0,504309918	28,89482984	1,781058378
63	14,0161253	0,437068454	25,04217776	15,661753	0,481138231	27,56719002	1,645627799
62	13,653653	0,427105017	24,4713149	15,237335	0,469956492	26,92652354	1,583681939
60	12,9601903	0,407790085	23,36465079	14,429827	0,448327718	25,68728609	1,469636663
55	11,3820523	0,362624137	20,77683262	12,612205	0,397973763	22,80221697	1,230152437
50	9,97958393	0,321137947	18,39984902	11,017506	0,351959087	20,16577023	1,037922468
45	8,71032948	0,282574998	16,1903548	9,5885377	0,30935632	17,72481151	0,878208222
40	7,54399665	0,246358473	14,11530075	8,2856454	0,269470515	15,43952322	0,741648713
35	6,45811573	0,212034717	12,14869442	7,0801052	0,231762735	13,27902656	0,62198944
30	5,4354374	0,179236878	10,26951662	5,9503027	0,195802192	11,21863924	0,514865323
25	4,46229288	0,147660475	8,460322045	4,8794001	0,161234799	9,238073493	0,417107258
20	3,52751403	0,11704635	6,706261857	3,8538398	0,127761605	7,320200767	0,326325759

Fonte - O Autor 2013

De acordo com os resultados estimados, realizaram-se testes para comprovar se os cálculos haviam sido feitos de maneira correta, e os resultados obtidos coincidiram com os resultados calculados. Com isso, optou-se pelo uso do parâmetro L de 30 cm por obter um desvio de distância entre a água e o álcool de aproximadamente 4 centímetros com um valor de alfa não muito alto.

Optou-se então por fazer uma plataforma em formato de "L", com uma distância de 30cm do ponto de incidência do laser no prisma até um anteparo, onde o sensor seria fixado. A largura do anteparo foi então calculada pelo desvio máximo causado com a maior angulação de alfa para a distância L de 30cm, que seria de aproximadamente 50cm (Figura 33).

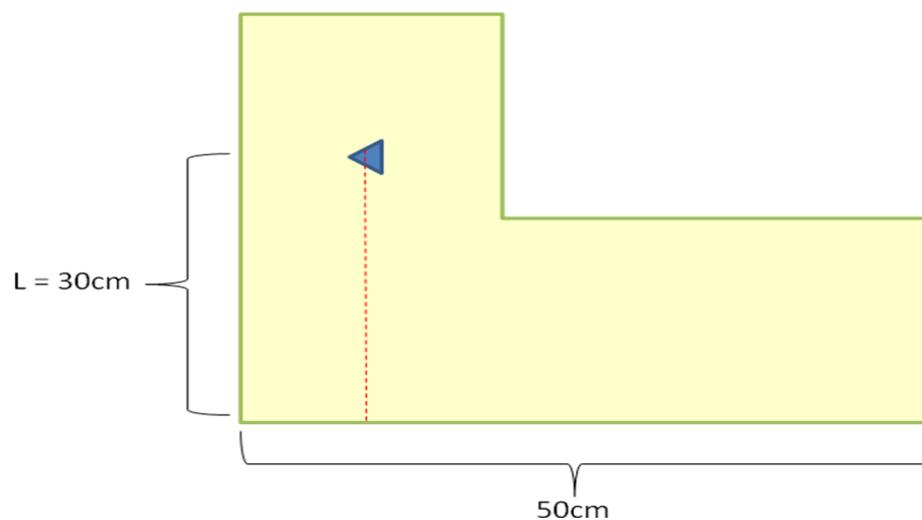


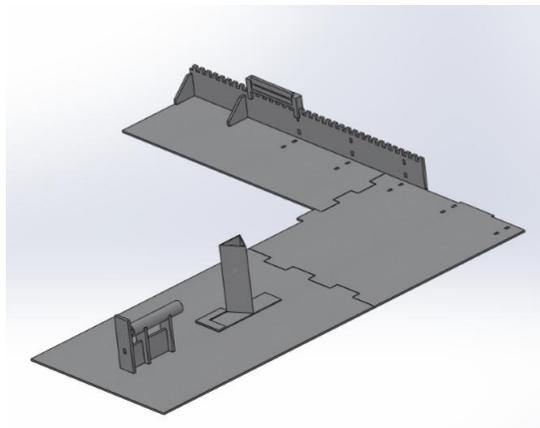
Figura 33 - Plataforma  
Fonte - O autor ( 2013)

Como a característica do comportamento do laser fazia com que os pontos que a luz iria incidir fossem diferentes para as diferentes angulações de prisma, foi necessário também projetar o anteparo que suportaria o sensor de uma maneira com a qual, ele pudesse se movimentar pelo anteparo, porém, sempre que estivesse estático, permanecesse numa posição conhecida e fixa. A solução para esta proposta foi um anteparo dentado, com passo de 6mm, capaz de encaixar em um suporte especialmente projetado (Figura 34) para manter o sensor fixo e em posição precisa quando necessário, porém, permitindo sua movimentação pelo anteparo quando necessário.



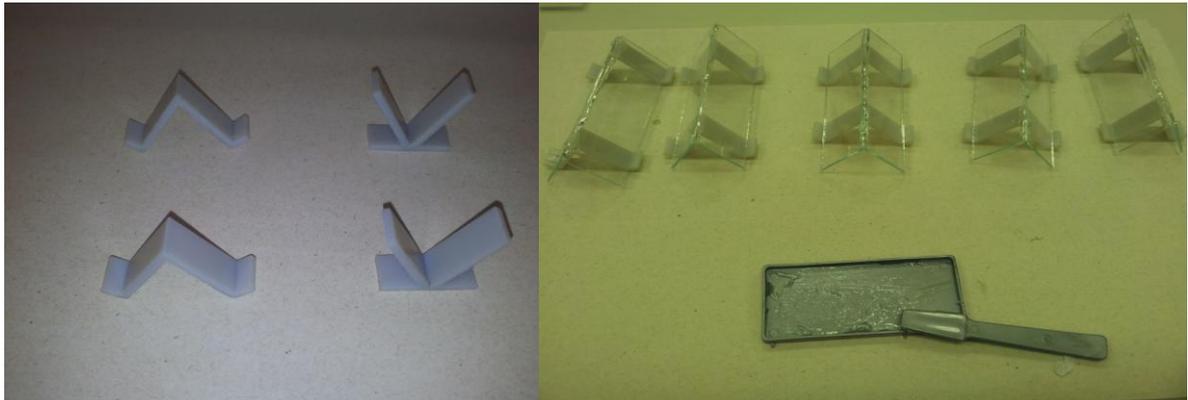
**Figura 34 - Peça para suporte do sensor no anteparo**  
Fonte- O autor (2013)

Com estes requisitos estipulados, foi então projetada em CAD a estrutura mecânica proposta, considerando algumas características como o suporte para laser, anteparos, montagem e encaixe das estruturas, como mostra a Figura 35.

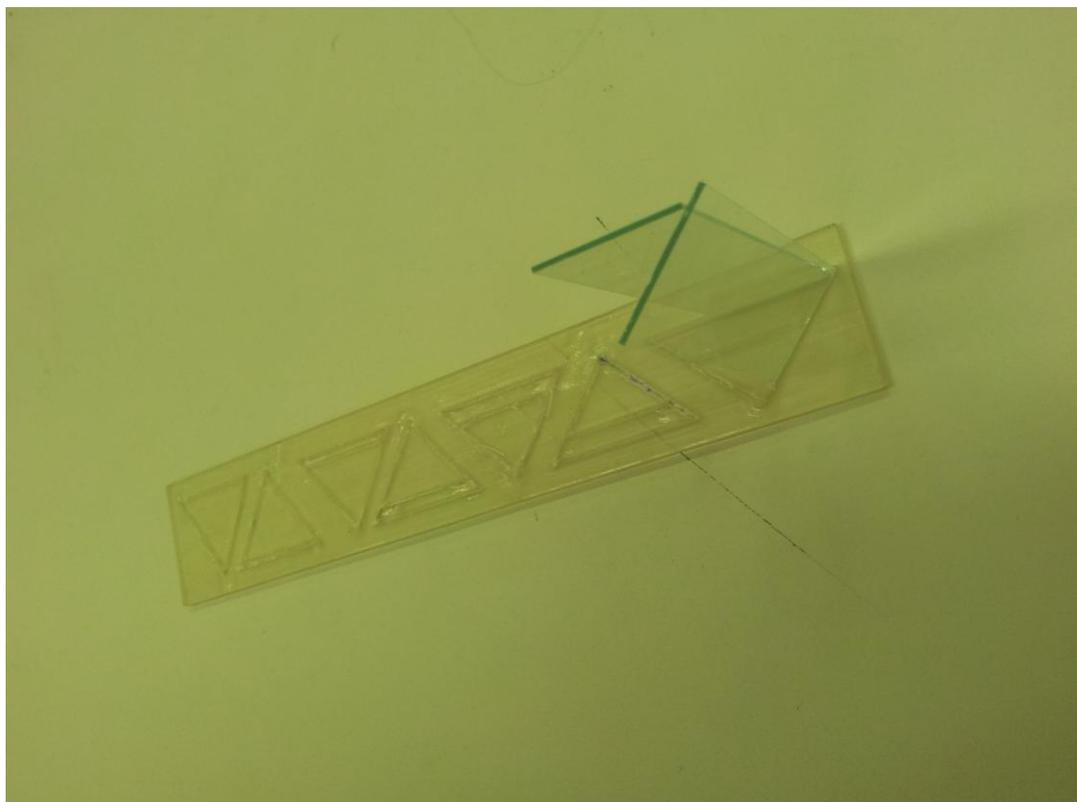


**Figura 35 - Estrutura mecânica proposta**  
Fonte- O autor (2008)

Outro ponto necessário no planejamento da montagem mecânica foi a confecção dos prismas, que deveriam ter várias angulações diferentes, porém os prismas com a mesma angulação precisariam ser sempre idênticos, o que seria um problema com montagem manual. Foram então projetados dois tipos de gabaritos para realizar a montagem dos prismas como mostram as Figuras 36 e 37 a seguir.



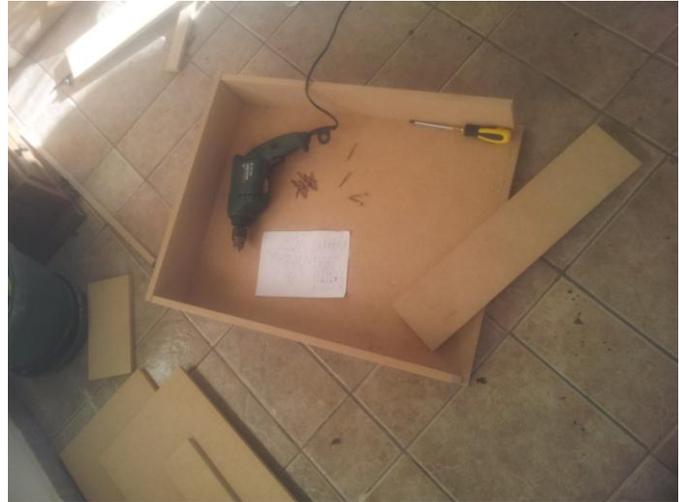
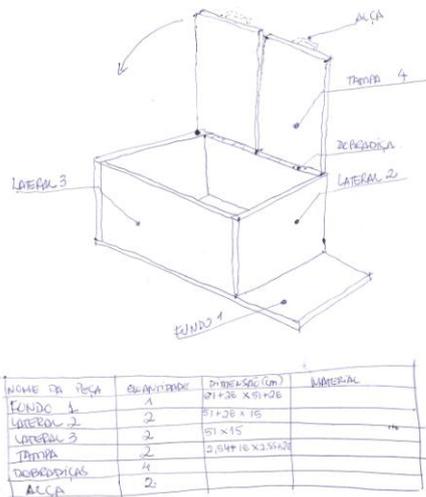
**Figura 36- Gabaritos para a montagem do sensor horizontalmente**  
Fonte- O autor (2013)



**Figura 37- Gabarito para montagens de prisma vertical**  
Fonte- O autor (2013)

Para conseguir estabelecer as condições metrológicas ideais para o aparelho, foi projetada e construída uma caixa de madeira, para acomodar o projeto,

sendo responsável por isolar o sensor da luz e também facilitar a mobilidade deste. Para a construção foi utilizada uma chapa de MDF 15mm, cortada com as dimensões esboçadas (Figura 38).



**Figura 38 - Projeto e construção da caixa de madeira**  
**Fonte - O autor (2013)**

A caixa foi montada, porém, observando-se a necessidade de mais um compartimento fechado, modificou-se o projeto original, ficando então com 3 tampas e 3 compartimentos isolados, como mostra a Figura 39.





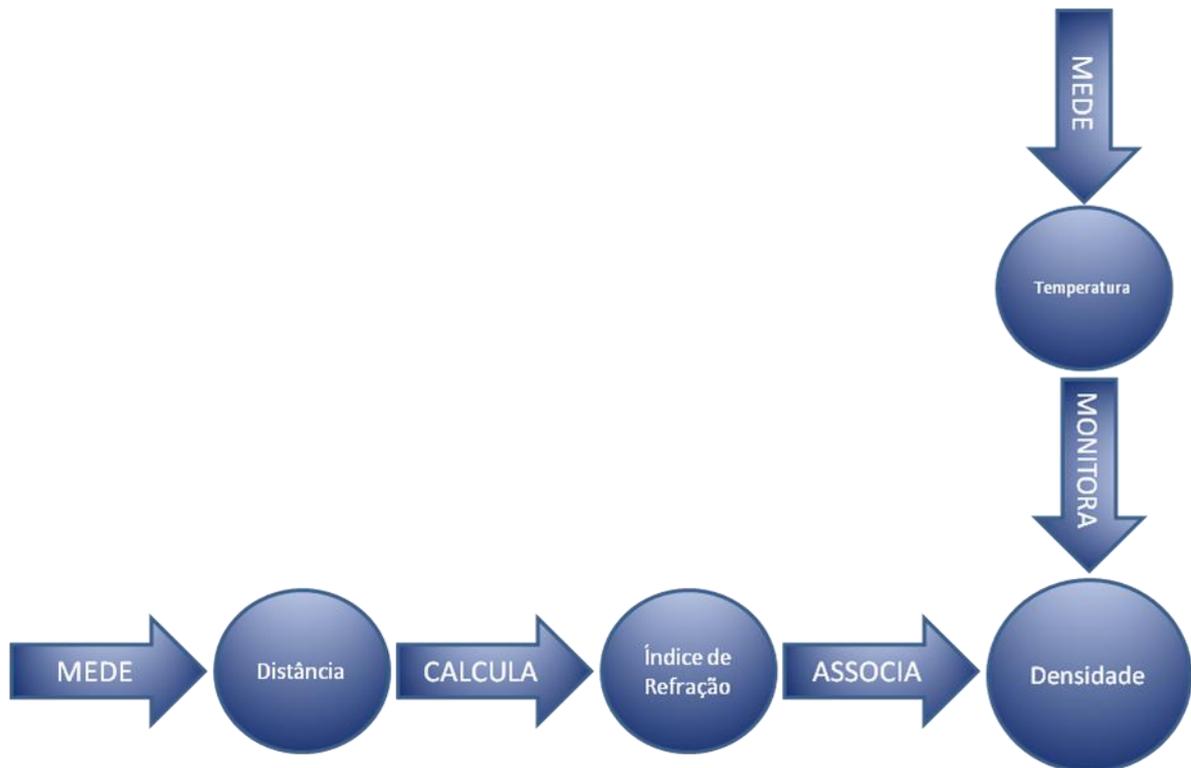
**Figura 39 - Caixa pronta**  
**Fonte – O autor (2013)**

Finalmente, com todas essas características alinhadas e a estrutura mecânica acomodada dentro do compartimento de madeira construído, o resultado final do desenvolvimento mecânico pôde ser concluído.

### 3.4 MEDIDAS E CALIBRAÇÃO

Esta etapa do projeto consistiu na calibração e no desenvolvimento dos métodos e processos de medição, testes e medidas sobre o comportamento dos mensurandos e a definição da escala para a conversão do índice de refração em densidade. Iniciou-se com a definição do processo de medição do instrumento, por se tratar de um sistema de medição indireto, que apesar de indicar a densidade de um objeto, mede um deslocamento e uma temperatura.

A partir disso, define-se que as medidas de temperatura e deslocamento são feitas de maneira independente, a de deslocamento por um sensor de foto-diodos e a de temperatura por um sensor de temperatura digital (LM35). Após a medida de deslocamento, o dado obtido passa por uma fase de cálculo, onde será obtido o índice de refração, e com este valor em conjunto com o monitoramento da temperatura através de sua medição, o aparelho desenvolvido associa esses parâmetros à uma densidade que será o valor indicado pelo sistema de medição (Figura 40).

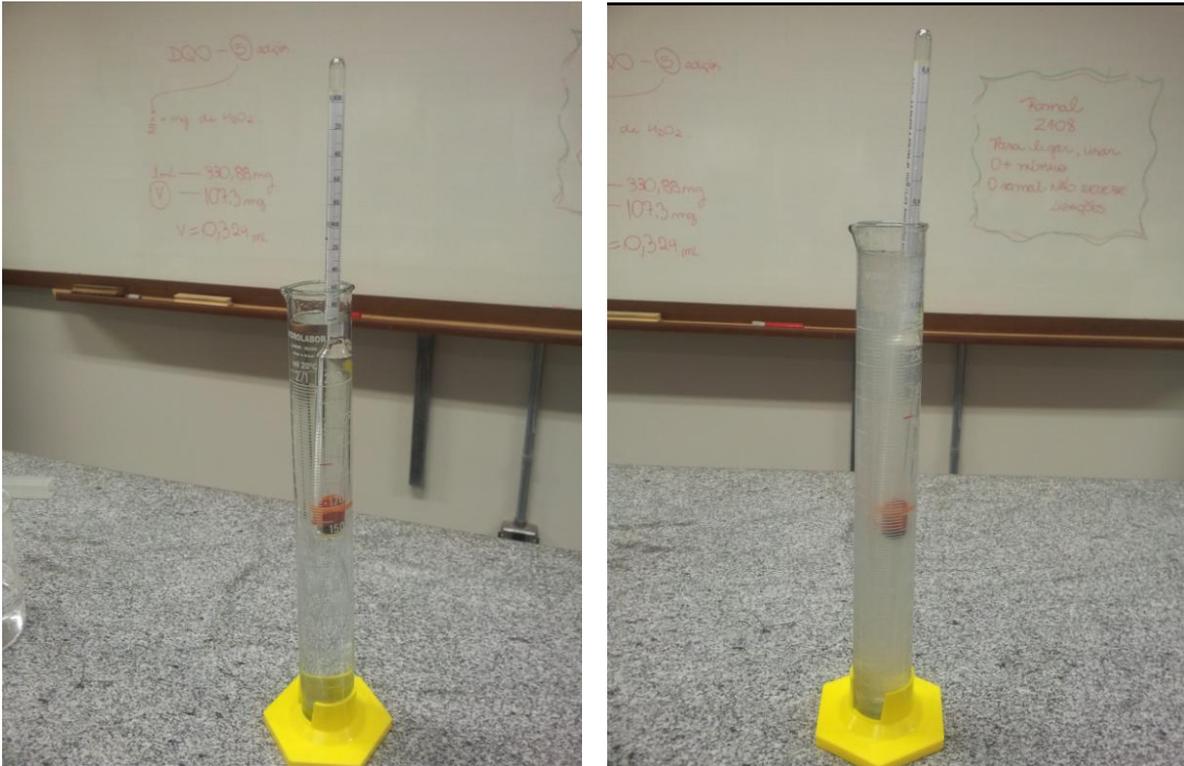


**Figura 40 - Roteiro de medição**  
 Fonte- O autor (2013)

É importante ressaltar que o sistema de medição desenvolvido não é auto-compensado, ou seja, o valor de densidade não é compensado de acordo com a temperatura medida.

Após definir o processo descrito anteriormente, foi então necessário fazer um levantamento sobre as substâncias a serem medidas, para identificar seu comportamento e a faixa de medição do sistema. O levantamento constituiu em pegar as amostras que seriam utilizadas nos testes e na calibração e realizar medições com outros instrumentos, para levantar as curvas de comportamento e de calibração do índice de refração e densidade em relação às diferentes concentrações da amostra.

O primeiro levantamento foi realizado para descobrir qual a densidade das amostras com diferentes concentrações, para ser utilizado como base na associação do índice de refração medido pelo sistema com a densidade a ser indicada. Para realizar este levantamento, utilizou-se um densímetro graduado convencional (Figura 41), com o auxílio de uma proveta, tornando possível a obtenção dos valores de densidade para as diferentes amostras.



**Figura 41 – Proveta**  
**Fonte- O Autor (2013)**

Com as medições finalizadas, foi possível consolidar a Tabela 7, com os valores de densidade para as diferentes amostras de álcool, com concentração variando de 0% a 98%, de 5% em 5%.

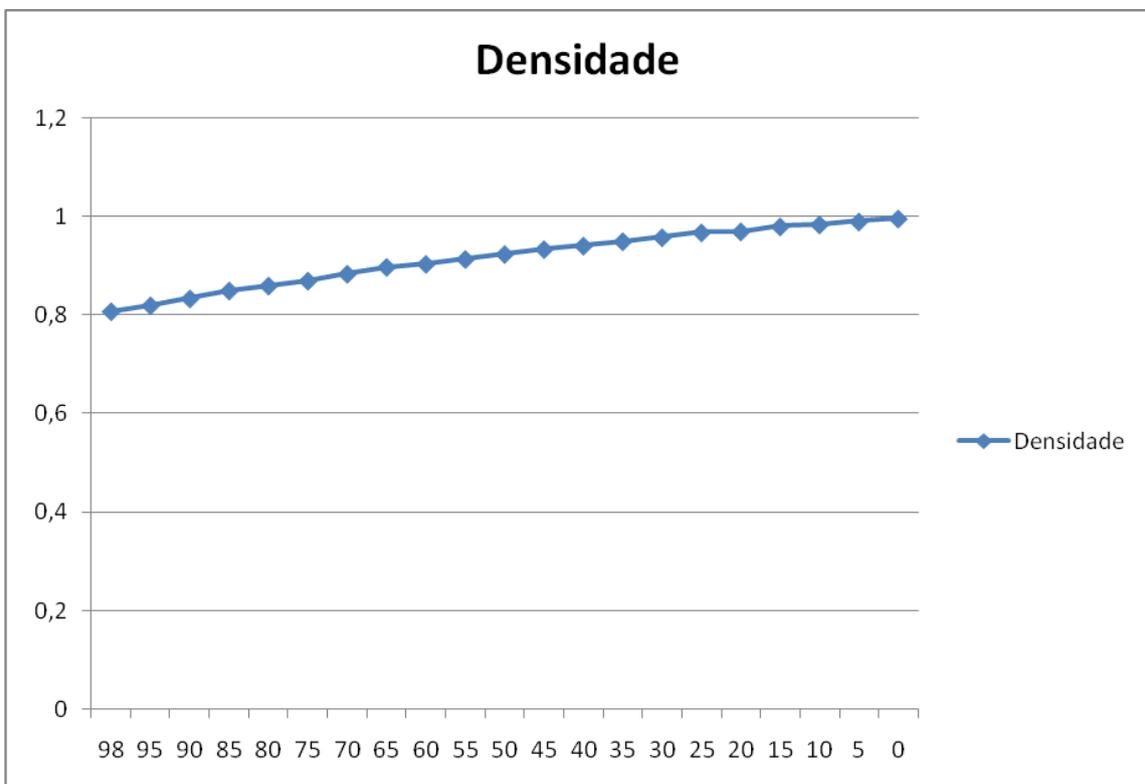
**TABELA 7 - Levantamento de densidade da mistura etanol-água**

Concentração(%)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Temperatura (°C)
98	0,808	24
95	0,82	24
90	0,834	24
85	0,85	24
80	0,86	24
75	0,87	24
70	0,884	24
65	0,898	24
60	0,904	24
55	0,914	24
50	0,924	24
45	0,934	24
40	0,941	24
35	0,95	24
30	0,958	24
25	0,968	24

20	0,97	24
15	0,98	24
10	0,984	24
5	0,99	24
0	0,996	24

**FONTE - O Autor (2013)**

Pôde-se então visualizar através do gráfico (Figura 42), plotado com os dados apresentados na Tabela 7, que o comportamento apresentado pela densidade das amostras com concentrações diferentes apresenta característica linear.



**Figura 42 - Gráfico de densidade das amostras**  
**Fonte - O autor (2013)**

O segundo levantamento foi realizado para identificar qual o comportamento do índice de refração das amostras no instrumento desenvolvido e em um refratômetro de bancada da marca ATAGO modelo DR-A1 (Figura 43).



**Figura 43 - Refratômetro de bancada utilizado no levantamento**  
**Fonte- O autor (2013)**

Esta etapa também serviu como base para a validação dos resultados obtidos. Foram realizadas 3 medições por amostra, cada uma feita por um operador diferente, para tentar deixar as condições de medição o mais realista possível. Com a média dos valores obtidos pôde-se montar a Tabela 8 representando o índice de refração pela concentração de álcool na amostra.

**Tabela 8 - Índices De Refração Levantados**

Concentração de Álcool(%)	Índice de Refração (Desenvolvido 63°)			Índice de Refração (Desenvolvido 76°)			Índice de Refração (Bancada)		
98	1,3669	1,3669	1,3669	1,3670	1,3670	1,3670	1,362	1,362	1,3621
95	1,3683	1,3683	1,3683	1,3688	1,3688	1,3688	1,3628	1,3631	1,363
90	1,3685	1,3685	1,3685	1,3689	1,3689	1,3689	1,3636	1,3632	1,3635
85	1,3685	1,3685	1,3685	1,3691	1,3691	1,3691	1,3631	1,3634	1,3634
80	1,3684	1,3684	1,3684	1,3690	1,3690	1,3690	1,3634	1,3632	1,3634
75	1,3676	1,3676	1,3676	1,3682	1,3682	1,3682	1,363	1,3629	1,3626
70	1,3667	1,3667	1,3667	1,3672	1,3672	1,3672	1,3623	1,3618	1,3622
65	1,3655	1,3655	1,3655	1,3663	1,3663	1,3663	1,3607	1,3611	1,3611
60	1,3642	1,3642	1,3642	1,3653	1,3653	1,3653	1,3601	1,3602	1,3602
55	1,3627	1,3627	1,3627	1,3638	1,3638	1,3638	1,3587	1,3588	1,3588
50	1,3605	1,3605	1,3605	1,3621	1,3621	1,3621	1,3575	1,3572	1,357
45	1,3587	1,3587	1,3587	1,3605	1,3605	1,3605	1,355	1,3549	1,3549
40	1,3554	1,3554	1,3554	1,3565	1,3565	1,3565	1,3531	1,3532	1,3532
35	1,3527	1,3527	1,3527	1,3539	1,3539	1,3539	1,3508	1,3505	1,3505
30	1,3512	1,3512	1,3512	1,3519	1,3519	1,3519	1,3488	1,3484	1,3484
25	1,3458	1,3458	1,3458	1,3460	1,3460	1,3460	1,3438	1,344	1,344

20	1,3431	1,3431	1,3431	1,3431	1,3431	1,3431	1,3418	1,3419	1,3419
15	1,3398	1,3398	1,3398	1,3399	1,3399	1,3399	1,3392	1,3393	1,3389
10	1,3373	1,3373	1,3373	1,3374	1,3374	1,3374	1,3367	1,3367	1,3366
5	1,3338	1,3338	1,3338	1,3341	1,3341	1,3341	1,3344	1,3346	1,3343
0	1,3325	1,3325	1,3325	1,3325	1,3325	1,3325	1,3327	1,3325	1,3324

Fonte- O Autor (2013)

**Tabela 9 - Média Dos Índices De Refração Medidos Pela Concentração**

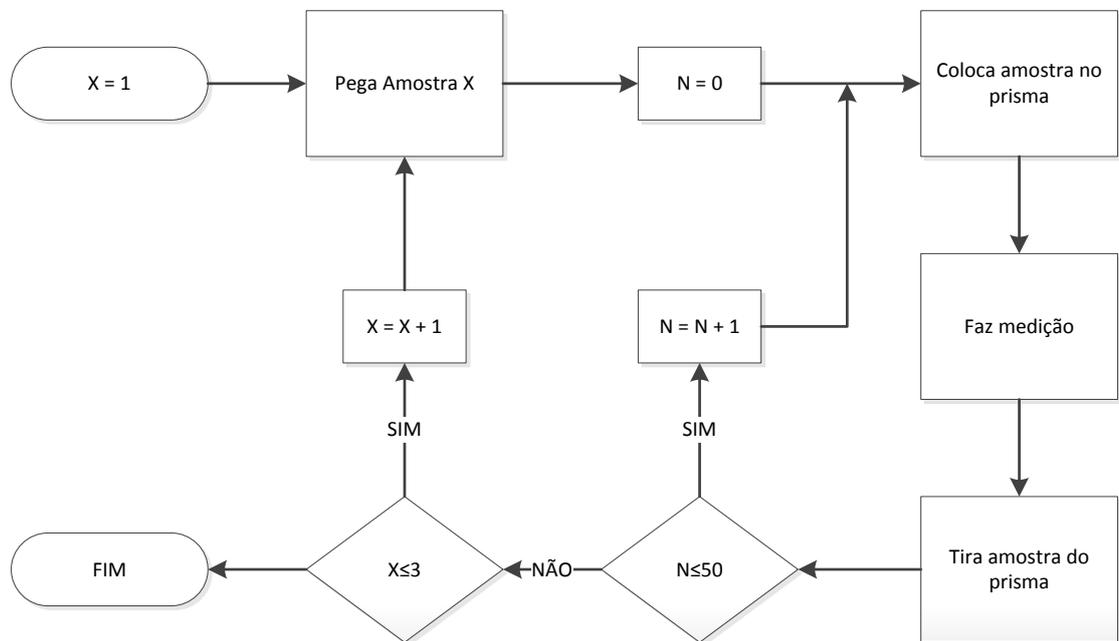
Concentração(%)	Índice de Refração Médio (Desenvolvido 63°)	Índice de Refração Médio (Desenvolvido 73°)	Índice de Refração Médio (Bancada)
98	1,3669	1,367	1,3620
95	1,3683	1,3688	1,3630
90	1,3685	1,3689	1,3635
85	1,3685	1,3691	1,3634
80	1,3684	1,369	1,3634
75	1,3676	1,3682	1,3629
70	1,3667	1,3672	1,3622
65	1,3655	1,3663	1,3611
60	1,3642	1,3653	1,3602
55	1,3627	1,3638	1,3588
50	1,3605	1,3621	1,3572
45	1,3587	1,3605	1,3549
40	1,3554	1,3565	1,3532
35	1,3527	1,3539	1,3505
30	1,3512	1,3519	1,3484
25	1,3458	1,346	1,3440
20	1,3431	1,3431	1,3419
15	1,3398	1,3399	1,3392
10	1,3373	1,3374	1,3367
5	1,3338	1,3341	1,3344
0	1,3325	1,3325	1,3325

Fonte- O Autor (2013)

Com estes dados, cada valor de refração obtido pelo sistema desenvolvido para cada concentração diferente, foi associado a um valor de densidade, medido no procedimento descrito pelo primeiro levantamento de dados.

A partir destes parâmetros iniciais levantados, realizaram-se 3 testes diferentes para verificar a reprodutibilidade dos resultados indicados pelo sistema e identificar os erros gerados por este sistema de medição. Cada teste foi aplicado para 3 diferentes amostras com os valores desejados conhecidos, com a repetição de 50 medições para cada amostra, conforme descreve-se a seguir:

- I. Teste 1 - A medição foi feita sem mover o prisma para reposição de líquidos para uma única amostra, sequencialmente. Como demonstra o fluxograma da Figura 44, este teste consiste em realizar as 50 medições para uma amostra com o prisma limpo. Quando estes 50 dados forem coletados, limpa-se o prisma sem movê-lo do lugar, preenche-se com uma nova amostra e realiza-se novamente as 50 medições. O objetivo deste teste é levantar os parâmetros de erro e reprodutibilidade quando o prisma permanece estático, para um único valor desejado de indicação, utilizando amostras sequenciais de uma mesma concentração.



**Figura 44- Fluxograma teste 1**

Fonte- O autor (2013)

A partir teste, coletou-se os dados da Tabela 10 à 15.

**Tabela 10 - Levantamento De Dados Para O Teste 1 Com Prisma 63° Para Água Pura Deionizada**

N	índice	N	Índice	N	índice	N	Índice	N	Índice
0	1,3300	10	1,3300	20	1,3296	30	1,3300	40	1,3300
1	1,3300	11	1,3300	21	1,3300	31	1,3296	41	1,3300
2	1,3300	12	1,3303	22	1,3300	32	1,3296	42	1,3300
3	1,3302	13	1,3300	23	1,3300	33	1,3300	43	1,3300
4	1,3303	14	1,3300	24	1,3300	34	1,3300	45	1,3300
5	1,3300	15	1,3300	25	1,3300	35	1,3300	46	1,3300
6	1,3303	16	1,3300	26	1,3300	36	1,3300	47	1,3300

7	1,3303	17	1,3302	27	1,3300	37	1,3300	48	1,3303
8	1,3300	18	1,3302	28	1,3300	38	1,3300	49	1,3300
9	1,3300	19	1,3300	29	1,3300	39	1,3300	50	1,3299

**FONTE- O autor (2013)**

**Tabela 11 - Levantamento De Dados Para O Teste 1 Com Prisma 63° Para Amostra Com 50% De Álcool**

N	índice	N	Índice	N	índice	N	Índice	N	Índice
0	1,3590	10	1,3595	20	1,3595	30	1,3595	40	1,3595
1	1,3594	11	1,3595	21	1,3595	31	1,3595	41	1,3595
2	1,3595	12	1,3595	22	1,3595	32	1,3596	42	1,3595
3	1,3595	13	1,3595	23	1,3595	33	1,3596	43	1,3595
4	1,3595	14	1,3595	24	1,3595	34	1,3596	45	1,3595
5	1,3595	15	1,3595	25	1,3595	35	1,3595	46	1,3593
6	1,3595	16	1,3595	26	1,3590	36	1,3595	47	1,3595
7	1,3595	17	1,3599	27	1,3595	37	1,3595	48	1,3595
8	1,3597	18	1,3595	28	1,3595	38	1,3595	49	1,3595
9	1,3597	19	1,3595	29	1,3594	39	1,3595	50	1,3595

**FONTE- O autor (2013)**

**Tabela 12 - Levantamento De Dados Para O Teste 1 Com Prisma 63° Para Amostra Com Álcool Puro - 98%**

N	índice	N	Índice	N	índice	N	Índice	N	índice
0	1,3664	10	1,3661	20	1,3662	30	1,3663	40	1,3664
1	1,3663	11	1,3660	21	1,3662	31	1,3662	41	1,3661
2	1,3666	12	1,3661	22	1,3667	32	1,3661	42	1,3661
3	1,3666	13	1,3661	23	1,3667	33	1,3662	43	1,3661
4	1,3666	14	1,3660	24	1,3661	34	1,3662	45	1,3661
5	1,3658	15	1,3661	25	1,3661	35	1,3664	46	1,3661
6	1,3662	16	1,3661	26	1,3662	36	1,3667	47	1,3662
7	1,3662	17	1,3661	27	1,3661	37	1,3662	48	1,3662
8	1,3661	18	1,3660	28	1,3661	38	1,3661	49	1,3662
9	1,3661	19	1,3662	29	1,3661	39	1,3661	50	1,3661

**Fonte- O autor (2013)**

**Tabela 13 - Levantamento de dados para o teste 1 com prisma 73° para água pura deionizada**

N	Índice	n	Índice	N	índice	N	Índice	N	Índice
0	1,3300	10	1,3300	20	1,3300	30	1,3300	40	1,3300
1	1,3298	11	1,3300	21	1,3300	31	1,3300	41	1,3300
2	1,3298	12	1,3300	22	1,3300	32	1,3300	42	1,3300

3	1,3299	13	1,3302	23	1,3300	33	1,3300	43	1,3300
4	1,3298	14	1,3302	24	1,3298	34	1,3300	45	1,3300
5	1,3300	15	1,3300	25	1,3298	35	1,3300	46	1,3300
6	1,3300	16	1,3300	26	1,3300	36	1,3300	47	1,3300
7	1,3300	17	1,3302	27	1,3300	37	1,3300	48	1,3300
8	1,3300	18	1,3302	28	1,3300	38	1,3300	49	1,3300
9	1,3302	19	1,3300	29	1,3300	39	1,3300	50	1,3300

Fonte- O autor (2013)

**Tabela 14 - Levantamento de dados para o teste 1 com prisma 73° para amostra com 50% de álcool**

N	Índice	n	Índice	N	índice	N	Índice	N	índice
0	1,3581	10	1,3586	20	1,3585	30	1,3586	40	1,3585
1	1,3583	11	1,3586	21	1,3586	31	1,3586	41	1,3584
2	1,3583	12	1,3586	22	1,3585	32	1,3584	42	1,3584
3	1,3583	13	1,3584	23	1,3586	33	1,3584	43	1,3583
4	1,3584	14	1,3584	24	1,3584	34	1,3585	45	1,3584
5	1,3586	15	1,3585	25	1,3584	35	1,3584	46	1,3586
6	1,3586	16	1,3585	26	1,3585	36	1,3584	47	1,3583
7	1,3586	17	1,3584	27	1,3585	37	1,3585	48	1,3584
8	1,3585	18	1,3585	28	1,3584	38	1,3586	49	1,3583
9	1,3585	19	1,3586	29	1,3585	39	1,3584	50	1,3583

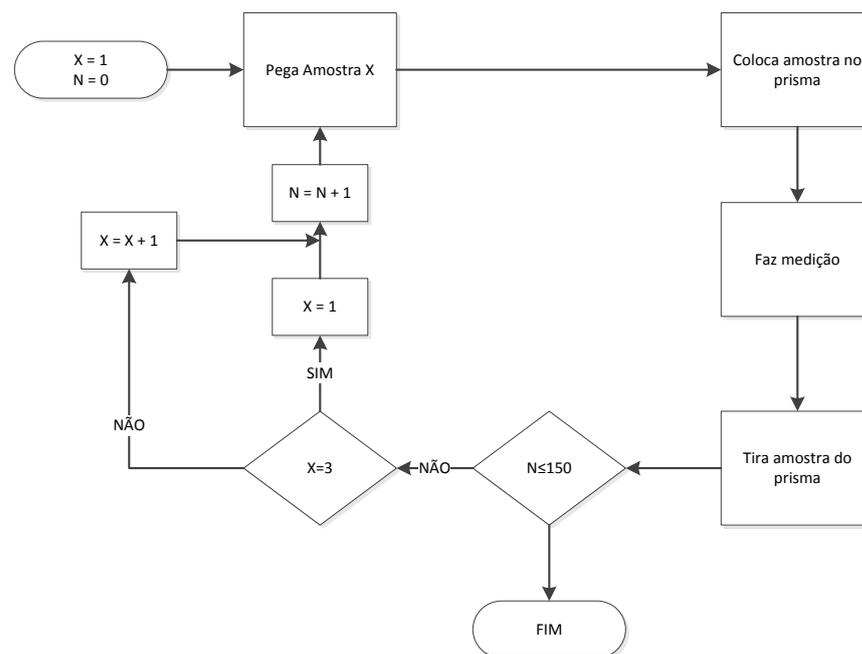
Fonte- O autor (2013)

**Tabela 15 - Levantamento de dados para o teste 1 com prisma 73° para amostra com álcool puro - 98%**

N	índice	N	Índice	N	índice	N	Índice	N	índice
0	1,3649	10	1,3647	20	1,3648	30	1,3649	40	1,3649
1	1,3650	11	1,3648	21	1,3649	31	1,3649	41	1,3649
2	1,3650	12	1,3648	22	1,3649	32	1,3650	42	1,3649
3	1,3647	13	1,3646	23	1,3647	33	1,3648	43	1,3648
4	1,3647	14	1,3647	24	1,3650	34	1,3649	45	1,3647
5	1,3649	15	1,3647	25	1,3649	35	1,3648	46	1,3650
6	1,3648	16	1,3648	26	1,3646	36	1,3649	47	1,3649
7	1,3648	17	1,3650	27	1,3648	37	1,3650	48	1,3648
8	1,3649	18	1,3649	28	1,3648	38	1,3648	49	1,3648
9	1,3649	19	1,3650	29	1,3648	39	1,3649	50	1,3648

FONTE- O autor (2013)

- II. Teste 2 - A medição foi feita sem mover o prisma para reposição de líquidos para 3 amostras, 50 vezes por amostra, intercalando a amostra medida durante 150 medições realizadas sequencialmente. Este método pode ser encontrado no fluxograma esboçado na Figura 45, descrevendo o processo deste teste, no qual, uma mesma amostra nunca será medida sequencialmente pelo instrumento, pois ela será colocada no recipiente, a medição será realizada, e então, retirá-la sem mover o prisma do lugar e sem realizar a limpeza do prisma, coloca-se uma nova amostra de concentração diferente no recipiente, repetindo as etapas. O objetivo principal deste teste é identificar os erros que os resíduos de uma amostra podem gerar na indicação gerada pelo sistema.



**Figura 45 - Fluxograma para o teste 2**  
**Fonte- O autor (2013)**

Como no teste anterior, foram levantadas seis Tabelas (Tabelas 16; 17; 18; 19; 20; 21), com os resultados das 50 medições realizadas pelo sistema de medição.

**Tabela 16 - Levantamento De Dados Para O Teste 1 Com Prisma 63° Para Água Pura Deionizada**

N	índice	N	índice	N	índice	N	Índice	N	índice
0	1,3300	10	1,3304	20	1,3304	30	1,3305	40	1,3300
1	1,3307	11	1,3309	21	1,3302	31	1,3301	41	1,3304
2	1,3304	12	1,3304	22	1,3300	32	1,3300	42	1,3306
3	1,3300	13	1,3300	23	1,3305	33	1,3304	43	1,3302
4	1,3301	14	1,3305	24	1,3302	34	1,3302	45	1,3304
5	1,3304	15	1,3304	25	1,3301	35	1,3307	46	1,3324
6	1,3305	16	1,3302	26	1,3300	36	1,3304	47	1,3306
7	1,3302	17	1,3307	27	1,3309	37	1,3302	48	1,3308
8	1,3301	18	1,3305	28	1,3316	38	1,3300	49	1,3316
9	1,3300	19	1,3302	29	1,3304	39	1,3309	50	1,3304

Fonte- O Autor (2013)

**Tabela 17 - Levantamento De Dados Para O Teste 1 Com Prisma 63° Para Amostra Com 50% De Álcool**

N	Índice	n	Índice	N	índice	n	Índice	N	índice
0	1,3595	10	1,3595	20	1,3597	30	1,3598	40	1,3588
1	1,3592	11	1,3592	21	1,3590	31	1,3596	41	1,3590
2	1,3594	12	1,3596	22	1,3594	32	1,3596	42	1,3592
3	1,3593	13	1,3594	23	1,3596	33	1,3594	43	1,3589
4	1,3596	14	1,3593	24	1,3596	34	1,3597	45	1,3594
5	1,3595	15	1,3590	25	1,3594	35	1,3592	46	1,3593
6	1,3594	16	1,3596	26	1,3592	36	1,3594	47	1,3590
7	1,3596	17	1,3592	27	1,3597	37	1,3591	48	1,3595
8	1,3594	18	1,3596	28	1,3590	38	1,3596	49	1,3591
9	1,3595	19	1,3594	29	1,3595	39	1,3592	50	1,3593

Fonte- O autor (2013)

**Tabela 18 - Levantamento de dados para o teste 1 com prisma 63° para amostra com álcool puro - 98%**

N	Índice	N	Índice	N	índice	n	Índice	N	índice
0	1,3666	10	1,3666	20	1,3663	30	1,3664	40	1,3666
1	1,3660	11	1,3668	21	1,3666	31	1,3668	41	1,3664
2	1,3668	12	1,3667	22	1,3668	32	1,3669	42	1,3668
3	1,3669	13	1,3665	23	1,3668	33	1,3661	43	1,3666
4	1,3667	14	1,3662	24	1,3660	34	1,3662	45	1,3666
5	1,3668	15	1,3666	25	1,3664	35	1,3666	46	1,3659
6	1,3665	16	1,3667	26	1,3667	36	1,3666	47	1,3669
7	1,3668	17	1,3664	27	1,3668	37	1,3668	48	1,3667

8	1,3669	18	1,3669	28	1,3669	38	1,3664	49	1,3666
9	1,3667	19	1,3665	29	1,3664	39	1,3665	50	1,3668

Fonte- o autor (2013)

**Tabela 19 - Levantamento de dados para o teste 1 com prisma 73° para água pura deionizada**

N	índice	N	índice	N	índice	n	Índice	N	índice
0	1,3300	10	1,3324	20	1,3316	30	1,3300	40	1,3306
1	1,3303	11	1,3297	21	1,3304	31	1,3302	41	1,3307
2	1,3300	12	1,3302	22	1,3302	32	1,3298	42	1,3305
3	1,3316	13	1,3304	23	1,3304	33	1,3297	43	1,3302
4	1,3298	14	1,3314	24	1,3298	34	1,3305	45	1,3298
5	1,3300	15	1,3304	25	1,3303	35	1,3304	46	1,3300
6	1,3303	16	1,3300	26	1,3305	36	1,3304	47	1,3305
7	1,3298	17	1,3302	27	1,3324	37	1,3302	48	1,3304
8	1,3299	18	1,3304	28	1,3302	38	1,3298	49	1,3307
9	1,3302	19	1,3298	29	1,3304	39	1,3297	50	1,3300

Fonte- O autor (2013)

**Tabela 20 - Levantamento de dados para o teste 1 com prisma 73° para amostra com 50% de álcool**

N	índice	N	Índice	N	índice	N	Índice	N	índice
0	1,3581	10	1,3579	20	1,3576	30	1,3579	40	1,3578
1	1,3579	11	1,3578	21	1,3579	31	1,3576	41	1,3576
2	1,3578	12	1,3581	22	1,3580	32	1,3580	42	1,3580
3	1,3579	13	1,3580	23	1,3578	33	1,3581	43	1,3582
4	1,3579	14	1,3578	24	1,3580	34	1,3582	45	1,3579
5	1,3577	15	1,3579	25	1,3581	35	1,3579	46	1,3578
6	1,3578	16	1,3580	26	1,3578	36	1,3577	47	1,3580
7	1,3576	17	1,3577	27	1,3579	37	1,3582	48	1,3581
8	1,3578	18	1,3579	28	1,3580	38	1,3580	49	1,3578
9	1,3577	19	1,3580	29	1,3581	39	1,3580	50	1,3576

Fonte- O autor (2013)

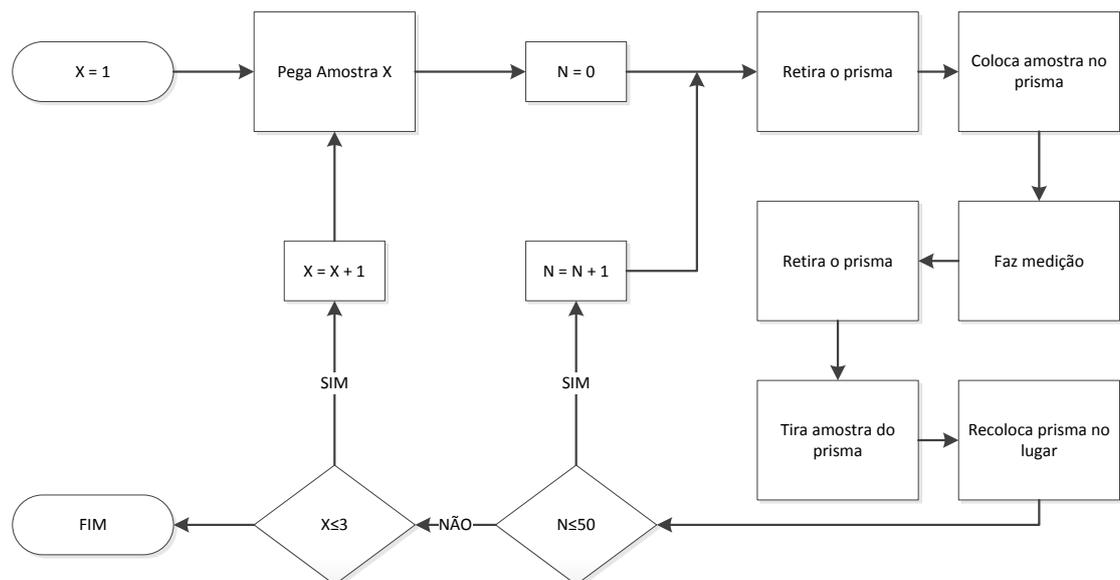
**Tabela 21 - Levantamento de dados para o teste 1 com prisma 73° para amostra com álcool puro - 98%.**

N	índice	n	Índice	N	índice	N	Índice	N	índice
0	1,3652	10	1,3651	20	1,3650	30	1,3652	40	1,3648
1	1,3651	11	1,3646	21	1,3650	31	1,3650	41	1,3649
2	1,3651	12	1,3648	22	1,3652	32	1,3647	42	1,3649
3	1,3650	13	1,3652	23	1,3647	33	1,3648	43	1,3650
4	1,3650	14	1,3651	24	1,3648	34	1,3646	45	1,3647

5	1,3649	15	1,3651	25	1,3650	35	1,3648	46	1,3649
6	1,3651	16	1,3647	26	1,3651	36	1,3652	47	1,3652
7	1,3643	17	1,3651	27	1,3652	37	1,3650	48	1,3650
8	1,3653	18	1,3648	28	1,3648	38	1,3650	49	1,3646
9	1,3652	19	1,3649	29	1,3650	39	1,3648	50	1,3647

**FONTE- O autor (2013)**

- III. Teste 3 - A medição das amostras foi feita retirando-se o prisma para reposição de líquidos. Como ilustrado no fluxograma da Figura 46, os testes foram feitos sequencialmente para uma única amostra por cinquenta vezes, para as diferentes amostras a serem usadas, de maneira similar ao teste 1, porém, removendo o prisma para colocar e tirar o líquido deste. O objetivo deste terceiro teste foi levantar quais são os erros do sistema quando ocorre a movimentação do prisma durante a troca de amostras.



**Figura 46 - Fluxograma teste 3**

**Fonte- O autor (2013)**

Na realização deste terceiro teste, também seriam coletados os dados da medidos, com toda via, quando iniciou-se o teste e a segunda amostra foi coloca, percebeu-se que o ponto de incidência de luz mudava e este tinha de ser ajustado novamente, o que altera as condições com que o teste começou a ser realizado, invalidando a possibilidade deste.

Então, através destes dados levantados foi possível conhecer qual o erro aleatório e o erro sistemático do sistema de medição para os diversos

procedimentos de medição diferentes, a sua tendência e repetitividade, o seu desvio-padrão e a incerteza-padrão, como também a sua curva gaussiana formada pelos erros aleatórios do sistema.

Esta etapa tratou-se da coleta e análise de dados para conhecer melhor o mensurando que foi trabalhado e o instrumento projetado.

Com isto finalizou-se a fase de calibração do trabalho desenvolvido.

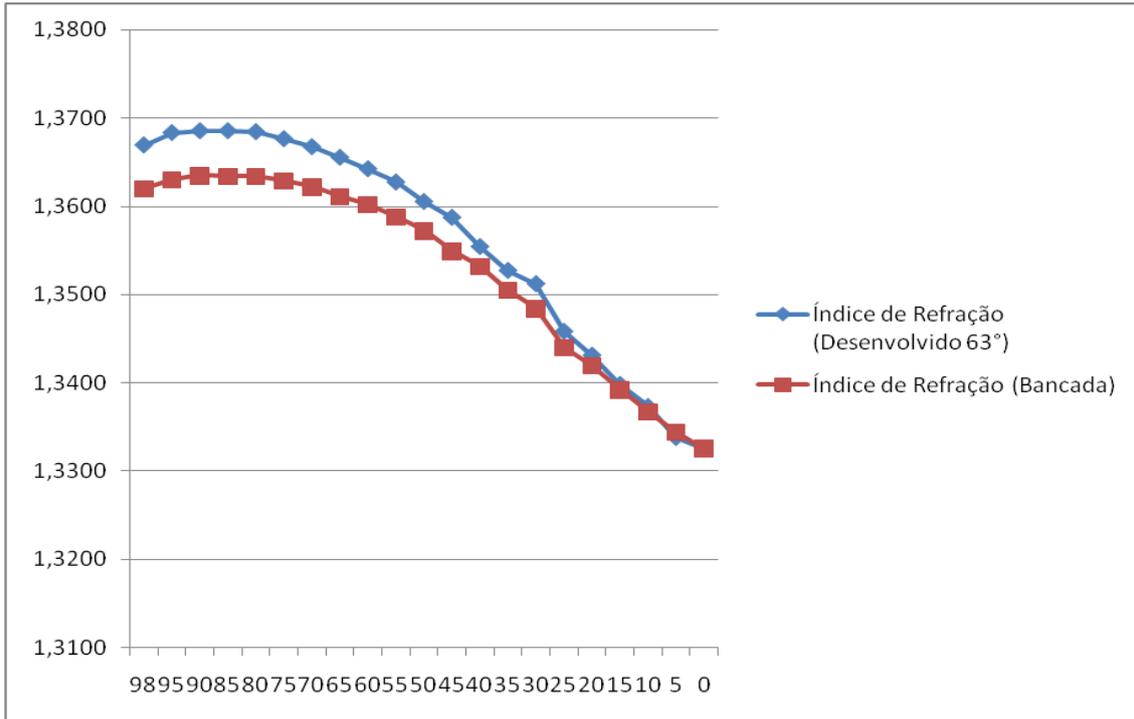
## 4 TESTE E RESULTADOS

Para alcançar os objetivos deste trabalho, esta sessão irá detalhar alguns testes realizados, expor e analisar os resultados obtidos neste projeto.

### 4.1 Teste de Funcionamento

Este teste tratou-se da prova de conceito do projeto para verificar se o instrumento desenvolvido foi capaz de se comportar de acordo com o previsto, validando o trabalho, composto por um sistema mecânico e um sistema eletrônico, dividido em *hardware* e *software*.

A validação do sistema mecânico foi feita inicialmente com as amostras mais próximas dos extremos da faixa de medição do aparelho, com água pura e álcool 98%. Com estas amostras foi possível comparar os valores de índice de refração e distância de desvio obtidos com os calculados previamente. Nos primeiros resultados obtidos foi possível verificar uma inconsistência de valores para a amostra de álcool. Levantou-se então a média para o índice de refração de cada amostra com concentração diferente e realmente foi comprovada uma inconsistência nos valores medidos, com base nos calculados. Também foi traçada uma curva de índice de refração por concentração para fazer a validação dos resultados práticos obtidos com o aparelho desenvolvido, que resultou novamente na conclusão de que havia inconsistência entre os valores baseado na Tabela 9 (Tabela de comparação de índices), que levou à considerar a hipótese do instrumento desenvolvido estar apresentando resultados errados. Contudo, após uma análise mais cautelosa nas curvas de refração por concentração do aparelho de bancada e de desenvolvido, foi possível identificar um comportamento similar entre os dois resultados, analisando as curvas do gráfico (Figura 47).

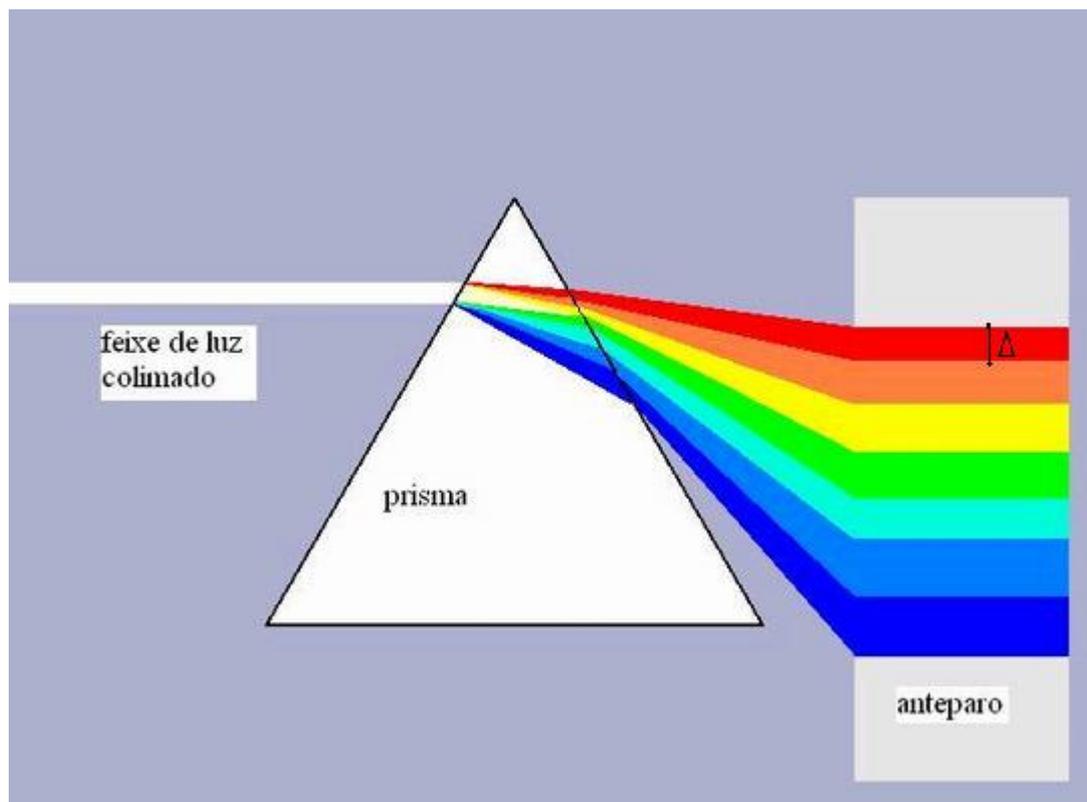


**Figura 47 - gráfico de comparação dos índices de refração para o aparelho desenvolvido e para o aparelho de bancada usado como referência**  
**Fonte- O autor (2013)**

Para verificar então se havia algo em comum entre as duas curvas, e constatar mesmo que não era apenas impressão de terem comportamentos parecidos, foi aplicada a fórmula da correlação nos conjuntos de dados. Com isto foi possível obter que a correlação entre as duas curvas é de 0,999543499, ou seja, muito correlacionadas. Somente após algumas análises foi possível verificar o motivo deste comportamento: o comprimento de onda  $\lambda$ . A faixa de frequências utilizada no projeto desenvolvido é a da cor vermelha, em torno de 700nm, enquanto a do refratômetro de Abbe utilizado é de 590,3, que equivale a cor laranja. Para meios com índice de refração menor, a diferença é quase imperceptível, no entanto quando as propriedades do meio mudam, o índice de refração se comporta de maneira não linear, o que acaba destacando estas diferenças de valor quando analisados os índices de refração medidos. E é importante ressaltar que é possível encontrar uma relação matemática entre estas duas curvas, só que para isto é necessário conhecer exatamente o valor do comprimento de onda de ambas as luzes no meio desejado(medido) e no meio de referência(ar), aplicando um coeficiente calculado da seguinte maneira para cada ponto da curva:

$$coef_{\text{verm/lar}} = \frac{\eta_{\text{verm/ar}}}{\eta_{\text{lar/ar}}} = \frac{\lambda_{\text{verm/meio}}}{\lambda_{\text{verm/ar}}} \cdot \frac{\lambda_{\text{lar/ar}}}{\lambda_{\text{lar/meio}}} \quad (24)$$

e assim corrigir o resultado de onda medido de acordo com a cor de luz utilizada, evitando que essa diferença de ângulo mostrada na Figura 48 seja um problema.



**Figura 48 - Diferença de desvio para dispersão de cores**  
 Fonte - Imagens google (2013)

#### 4.2 Testes de Calibração

Os testes de calibração tiveram por objetivo levantar as características metrológicas do sistema. Os testes I, II e III descritos na sessão 3.4 foram capazes de calcular os erros do sistema e outros parâmetros de análise.

Para o teste I e II foram realizadas 50 medidas para três amostras diferentes, utilizando dois tipos de prisma. A variação entre estes dois teste foi com relação a limpeza do recipiente após a realização da medida. No teste I o recipiente permanecia sempre limpo para uma amostra, e no teste II apenas se retiraria o

líquido, porém deixando seus resíduos no recipiente. Com isto foi possível calcular o desvio-padrão, incerteza-padrão, média e repetitividade, e comparar os dois resultados para verificar qual é o erro que resíduos contidos no recipiente podem gerar na indicação do sistema. Os valores calculados estão na Tabela 22.

**Tabela 22 - Tabela De Paramêtros Metrológicos**

Ângulo Prisma	Amostra	Teste I				Teste II			
		Desvio-padrão	Média	Incerteza Padrão	Repetitividade	Desvio-padrão	Média	Incerteza Padrão	Repetitividade
63	Água Pura	0,0001	1,3300	0,0001	0,0003	0,0005	1,3304	0,0005	0,0009
63	Álcool 50%	0,0001	1,3595	0,0001	0,0003	0,0002	1,3594	0,0002	0,0005
63	Álcool 98%	0,0002	1,3662	0,0002	0,0004	0,0003	1,3666	0,0003	0,0005
76	Água Pura	0,0001	1,3300	0,0001	0,0002	0,0006	1,3303	0,0006	0,0012
76	Álcool 50%	0,0001	1,3585	0,0001	0,0002	0,0002	1,3579	0,0002	0,0003
76	Álcool 98%	0,0001	1,3648	0,0001	0,0002	0,0002	1,3649	0,0002	0,0004

**FONTE- O autor (2013)**

Com estes resultados, conclui-se que quando se usa apenas uma amostra e depois limpa-se o recipiente, o resultado possui uma reprodutibilidade maior, contudo, os desvios apresentados no teste II não apresentam uma variação muito notável, o que torna possível a utilização dos dois métodos sem muita preocupação com variações bruscas na indicação de medida, ainda assim sendo o método relatado no teste I mais confiável.

O teste III tinha o mesmo objetivo dos testes I e II, porém para levantar os dados quando se retirava o prisma para trocar a amostra. No entanto, quando iniciou-se este teste, percebeu-se que cada vez que o prisma era colocado novamente, o sistema mecânico necessitava um novo ajuste com relação ao posicionamento do laser e do sensor, mudando as características iniciais da medida, e invalidando o teste.

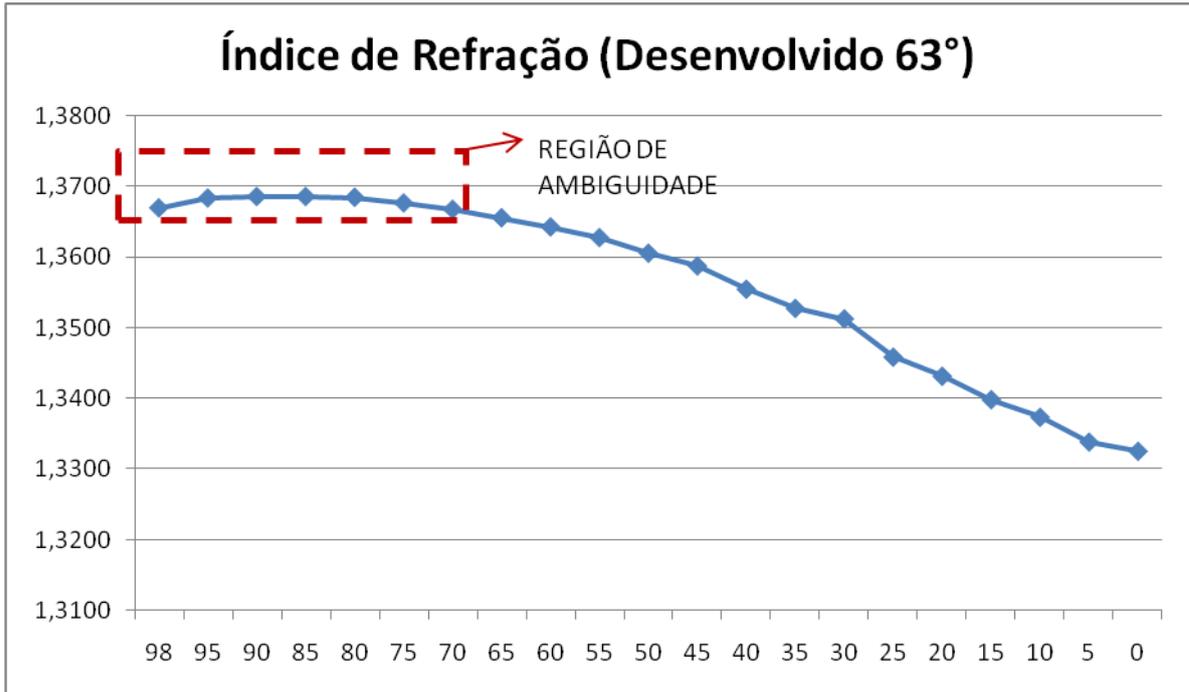
É também importante ressaltar que o erro sistemático e a tendência não foram calculados para este sistema de medição, devido ao fato de não se saber o Valor Verdadeiro Convencional para o índice de refração com a luz vermelha. O valor apresentado pelo sistema está coerente, porém não há um valor verdadeiro conhecido para realizar estes cálculos.

Ainda pertencentes aos testes de calibração, foram notados alguns detalhes relevantes para o funcionamento do sistema. O primeiro é referente ao uso de

diferente amostras. Os resíduos podem atrapalhar na indicação do resultado, porém se o recipiente for lavado com água deionizada antes do uso da próxima amostra, o resultado se torna muito mais confiável, pois ela ajuda a eliminar as moléculas livres que podem interferir na medição. Outro ponto importante é durante a realização da medida em si. O sistema necessita de um tempo mínimo para que uma medição precisa seja efetuada, porque deve-se esperar que o sistema estabilize, tendo relação com o tempo que o sensor de deslocamento leva para a contagem de *pixels*, pois este é capacitivo e demora para enviar a resposta final, para evitar erros e contornar esse problema a interface possui um sistema gráfico que possibilita o usuário visualizar a forma de onda captada pelo sensor antes de prosseguir com os cálculos, caso a forma de onda não esteja adequada o usuário pode realizar uma nova captura de dados até que os dados sejam satisfatórios para o cálculo.

#### 4.3 Teste de Validação

Este teste consistiu-se em validar o resultado proposto pelo projeto, através de uma possível aplicação prática para este, identificação de fraude em combustíveis. Foram coletadas amostras de quatro postos de gasolina diferentes, dois confiáveis e dois de qualidade duvidosa. Os combustíveis então foram testados pelo sistema de medição desenvolvido, porém não apresentou um resultado satisfatório. Isto deve-se à substância utilizada nos teste, a mistura etanol-água. Como verificado no gráfico (Figura 49), composto pelas informações coletadas no levantamento da curva de índice de refração por concentração de álcool, esta possui uma região de ambiguidade, na qual não é possível identificar qual a concentração do correspondente índice de refração.



**Figura 49 - Curva de índice de refração por concentração destacando região de ambiguidade**  
**Fonte- O autor (2013)**

Segundo Terada (2010), este fenômeno ocorre por que quando a mistura etanol-água é realizada, suas partículas interagem resultando na chamada hidratação hidrofílica, responsável pelo surgimento agrupamentos moleculares, que mudam a estrutura da água. Isto faz com que parâmetros físico-químicos possam variar de maneira não linear com a concentração de álcool, sendo uma dessas variáveis, o índice de refração. A região de resposta ambígua do sistema desenvolvido encontra-se entre as concentrações de 70% e 100% de etanol, com um resultado muito próximo do encontrado por Terada (2010), que descreve a região ambígua entre 60% e 100% de álcool.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme os objetivos propostos para este trabalho, foi desenvolvido um instrumento de medição de densidade através dos princípios da refração, para tentar suprir a necessidade do mercado por um instrumento de medição de densidade capaz de combinar mobilidade, confiabilidade e custo reduzido.

O instrumento desenvolvido é constituído por um sistema mecânico-óptico, composto por toda parte estrutural do aparelho e seus instrumentos ópticos, e por um sistema eletrônico, composto por *software* e *hardware*.

No desenvolvimento da parte mecânica, foi necessário o uso das ferramentas mais precisas disponíveis para fazer os gabaritos de montagens dos prismas e cortes da estrutura, pois por se tratar de um sistema óptico, qualquer variação mínima pode afetar de maneira brusca no resultado final. Na realização dos testes de prova de conceito, alguns prismas construídos foram invalidados, sem um motivo aparente, mas depois de análises posteriores, concluiu-se que o resultado disso foi a variância de aproxima de  $5^\circ$  nos seus ângulos de vértice. Outro aspecto analisado com relação aos prismas foi com questão à superfície de incidência de luz, outro motivo por invalidar alguns outros prismas do projeto. Qualquer imperfeição ou interferência da superfície na qual o feixe luminoso incide sobre o prisma, pode causar inconsistência nos resultados.

Com relação ao desenvolvimento da parte eletrônica, os maiores complicadores estiveram ligados à parte de *hardware*. A ocorrência de soldas frias e mal contatos fazem com que o sistema não funcione de maneira adequada, no entanto, estes fatores são de simples resolução, mas de difícil identificação. A parte de *software* não apresentou problemas aparentes, apenas algumas inconsistências em resultados quando as condições metrológicas de estabilidade não eram respeitadas, necessitando esperar a amostra e a resposta do sistema eletrônico estabilizar para realizar uma leitura coerente.

Com relação ao sistema desenvolvido, a prova do conceito se mostrou existente em seu funcionamento, no entanto quando os resultados foram analisados em comparação ao refratômetro de bancada usado como base para o dados, apareceu uma aparente inconsistência entre seus valores. Com uma análise mais aprofundada neste resultado obtido, foi possível perceber que não era uma inconsistência em si, mas sim uma variação devido à parâmetros físicos do sistema,

pois a correlação entre os conjuntos de dados ficou muito próxima à 1. Essa diferença ocorre devido a um resultado causado pela frequência de operação da fonte luminosa do instrumento. O equipamento usado como referência operava na faixa de 589,3nm de comprimento de onda, o que equivale à luz laranja, e o equipamento desenvolvido opera na faixa da cor vermelha, aproximada de 700nm de comprimento de onda. A priori, o comprimento de onda não interfere nessa medição de índice de refração, porém, como as amostras usadas se comportaram de maneira não linear, ocorreu esta diferença entre os índices de refração para as diferentes faixas de frequência de luz. É possível aplicar um fator corretor, quando o sistema vai utilizar uma faixa de frequência diferente da usada como referência, mas é necessário que se conheça os comprimentos de onda para cada amostra com concentração diferente utilizada na análise, tanto para a frequência do laser utilizado, quanto para a do de referência. Assim, os valores medidos podem ser comparados com valores conhecidos.

Sobre o sistema, também foram realizados os testes de calibração convencionais para levantar os dados metrológicos e os erros do sistema. Para realizar estes testes, desenvolveu-se um procedimento de calibração, elaborado para depender minimamente da influência humana. Com este teste, foi possível levantar os dados referentes aos erros de medição, desvio-padrão, incerteza padrão e repetitividade. Os erros levantados foram apenas os aleatórios, pois devido à falta de um valor de referência final exato para o sistema operando em 700nm, não foi possível identificar o erro sistemático. Com estes resultados, pôde-se observar também, que o sistema se mostrou preciso, pois, a dispersão entre suas medidas para um mesmo dado quase não apresentou dispersão, contudo, a sua exatidão não pôde ser constatada devido à falta de um valor de referência conhecido para os índices de refração, operando na frequência da cor vermelha. Os erros levantados igualmente constataram que o fato de deixar resíduos de amostras antigas no recipiente do prisma não afeta de maneira brusca os resultados da medição para uma nova amostra, porém, quando os testes são realizados para uma única amostra, sem resíduos, os resultados são muito mais confiáveis. Outro ponto observado é que quando estas trocas de amostras são feitas, se o recipiente for lavado com água deionizada antes de receber novas amostras, os dados medidos apresentam menos erros, devido ao fato da água deionizada eliminar uma

quantidade considerável de radicais livres presentes no ambiente amostrado, que podem influenciar no resultado.

No entanto, apesar de apresentar resultados coerentes e erros consideravelmente pequenos, quando foi feito o teste de validação com produtos confiáveis e os não confiáveis do mercado, o aparelho apresentou os resultados desejados. Isso aconteceu devido à uma característica química da mistura etanol-água, que resulta em uma característica do álcool, chamada hidratação hidrofílica, que altera em nível molecular as características da mistura e a estrutura da água. O resultado apresentado para as diferentes amostras de álcool vindo diretamente do posto é considerado inválido, porque devido à característica descrita, uma região de ambiguidade é formada para o resultado das amostras, não podendo diferenciar os índices de refração para diferentes concentrações de 98% à 70% de álcool.

Os resultados obtidos mostram que o conceito demonstrado pelo projeto apresenta um resultado consistente medindo índices de refração, porém, medi-lo e associando esse valor à uma densidade, pode apresentar resultados ineficientes, dependendo da amostra utilizada para a análise.

Com isto, concluí-se que o projeto desenvolvido poderia ser comercializado no mercado, porém, apenas para medir o índice de refração, evitando apresentar resultados inválidos de densidade.

Como sugestão para futuros projetos com o objetivo de eliminar a ambiguidade constatada, sugere-se que se desenvolva um sistema que use vários princípios de densidade em um só aparelho, e, através de um método de inteligência artificial analisem o resultado mais apropriado, por exemplo, combinando os método de medição por refração, pressão hidrostática e ultrassom. Outra sugestão para trabalhos futuros é a de considerar a frequência de operação de fonte luminosa, e aplicar uma auto compensação para este parâmetro, assim como, a utilização da auto compensação com relação à temperatura, já que neste projeto a temperatura foi apenas considerada como informação de monitoramento de dados, e não influenciável no resultado da medição.

Com isto, conclui-se que o trabalho desenvolvido, além de atingir os objetivos propostos, detectou características importantes a respeito de seu comportamento que não eram previstas, proporcionando a oportunidade para o desenvolvimento de novas pesquisas, trabalhos e até mesmo produtos relacionados

ao tema, tais como, medição de índice de refração, medição de densidade de líquidos e medição de concentração de misturas etanol-água.

## REFERÊNCIAS

ALBERTAZZI, A.; SOUZA, A. R. de. **Fundamentos de metrologia científica e industrial**. Editora Manole, São Paulo, 2008.

BRUNETTI, F. **Mecânica dos fluídos**. Prentice hall. São Paulo, 2005.

CIRINO, T. M. A.; COSTA, A. S.; BRAGA, A. F. M.; ALMEIDA, C.C.; MONTEIRO, G. L.; SILAS, S. **Controle de Qualidade em refratometria**. 2013.

CHARLES M.; CAROME, D.E.F.; SHAOUL, M.H.W.; Ezekiel Robert E. EINZIG, E.R.E. **Fiberoptic Sensor Technology Handbook**. 1982.

ENGENHARIA DA CERVEJA. **Densidade**. Disponível em: <[http://www.engenhariadacerveja.com.br/2013/densidade\\_pt/](http://www.engenhariadacerveja.com.br/2013/densidade_pt/)>e[http://www.google.com.br/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=images&cd=&cad=rja&docid=ywNkZbtscsdnzM&tbnid=VzJmwRGxZutHqM:&ved=0CAMQjhw&url=http%3A%2F%2Fma.if.usp.br%2Fconvite%2FConvitesHTML%2Ftodososconvites%2F2009-10\\_07.html&ei=Cg9XUfv3D4WE9QS\\_rYGgDg&bvm=bv.44442042,d.dmQ&psig=AFQjCNG4vCbYia\\_VnG8wr0-Z56UKF5sarQ&ust=1364746213700908](http://www.google.com.br/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=images&cd=&cad=rja&docid=ywNkZbtscsdnzM&tbnid=VzJmwRGxZutHqM:&ved=0CAMQjhw&url=http%3A%2F%2Fma.if.usp.br%2Fconvite%2FConvitesHTML%2Ftodososconvites%2F2009-10_07.html&ei=Cg9XUfv3D4WE9QS_rYGgDg&bvm=bv.44442042,d.dmQ&psig=AFQjCNG4vCbYia_VnG8wr0-Z56UKF5sarQ&ust=1364746213700908)> Acesso em: 14/03/2013.

FALCIAI, R.; MIGNANI, A.G.; VANNINI, A. **Long period gratings as solution concentration sensors**. Sensors and actuators B, n. 74, p. 74-77, 2001. Disponível em < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925400500007140> > acesso em: 10/01/2013.

GOOGLE 1. **Refratômetro de Abbe**. Disponível em: <<http://es.wikipedia.org/wiki/Refractometr%C3%ADa> > Acesso em 14/02/2013.

\_\_\_\_\_ 2. **Refratômetro De Bancada Abbe**. Disponível em: <[http://www.google.com.br/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=images&cd=&cad=rja&docid=Z8Fk6arCEMq4IM&tbnid=d6kJxa-xjcW1M:&ved=0CAMQjhw&url=http%3A%2F%2Fwww.shoppingdolaboratorio.com.br%2Fproduto.php%3Fcod\\_produto%3D699782&ei=E\\_RQUYLQE4Si9QTssIDoDA&bvm=bv.44158598,d.dmQ&psig=A](http://www.google.com.br/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=images&cd=&cad=rja&docid=Z8Fk6arCEMq4IM&tbnid=d6kJxa-xjcW1M:&ved=0CAMQjhw&url=http%3A%2F%2Fwww.shoppingdolaboratorio.com.br%2Fproduto.php%3Fcod_produto%3D699782&ei=E_RQUYLQE4Si9QTssIDoDA&bvm=bv.44158598,d.dmQ&psig=A)>

FQjCNEEpuxP7UvIx7SYOv2b26sdlkxFJw&ust=1364346202958698 > Acesso em 14/02/2013.

\_\_\_\_\_ 3. **Refratômetro de Bancada 1.** Disponível em: <http://www.google.com.br/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=images&cd=&cad=rja&docid=1ukxzrD04cS3FM&tbnid=z4ptNiWjKHeuaM:&ved=0CAMQjhw&url=http%3A%2F%2Fwww.gehaka.com.br%2Fproduto%2Frefratometro%2F&ei=HfZQUeiwOZOI9AT3qoHoBg&bvm=bv.44158598,d.dmQ&psig=AFQjCNEEpuxP7UvIx7SYOv2b26sdlkxFJw&ust=1364346202958698> > Acesso em 14/02/2013.

\_\_\_\_\_ 4. **Refratômetro de Bancada 2.** Disponível em: <<http://www.google.com.br/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=images&cd=&cad=rja&docid=RpNaDyqqeaxOmM&tbnid=U6q-BBvHT6q4wM:&ved=0CAMQjhw&url=http%3A%2F%2Floja.salvicasagrande.com.br%2Flaboratorio%2Frefratometro.html&ei=svZQUdveHle88wS2oIAG&psig=AFQjCNEEpuxP7UvIx7SYOv2b26sdlkxFJw&ust=1364346202958698>> Acesso em 14/02/2013.

\_\_\_\_\_ 5. **Refratômetro Portátil.** Disponível em: <<http://www.google.com.br/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=images&cd=&cad=rja&docid=IVb0iocy66Q7M&tbnid=xy7cgNgt4f4jfM:&ved=0CAMQjhw&url=http%3A%2F%2Fwww.splabor.com.br%2Fblog%2Ftag%2Frefratometro%2F&ei=ufVQUaKaEY249gSv5YCQDw&bvm=bv.44158598,d.dmQ&psig=AFQjCNEEpuxP7UvIx7SYOv2b26sdlkxFJw&ust=1364346202958698>> Acesso em 14/02/2013.

\_\_\_\_\_ 6. **Refratômetro Digital.** Disponível em: <<http://www.google.com.br/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=images&cd=&cad=rja&docid=IVb0iocy66Q7M&tbnid=Vtyjyga8QnGw2M:&ved=0CAMQjhw&url=http%3A%2F%2Fwww.splabor.com.br%2Fblog%2Ftag%2Frefratometro%2F&ei=HPdQUb3OBI89QTaroHICQ&bvm=bv.44158598,d.dmQ&psig=AFQjCNE9tQuwIC2pA5qaBwopzra3p7ugdQ&ust=1364346928342081>> Acesso em: 14/02/2013.

\_\_\_\_\_ 7. **Refratômetro Digital 1.** Disponível em: <[http://www.google.com.br/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=images&cd=&cad=rja&docid=h6JxM3x\\_hh0N8M&tbnid=R9BDpdNuNEniUM:&ved=0CAMQjhw&url=http%3A%2F%2Fre](http://www.google.com.br/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=images&cd=&cad=rja&docid=h6JxM3x_hh0N8M&tbnid=R9BDpdNuNEniUM:&ved=0CAMQjhw&url=http%3A%2F%2Fre)

fratometro.com.br%2F&ei=lvdQUYKoA4X68QTU6YDYAQ&bvm=bv.44158598,d.dmQ&psig=AFQjCNE9tQuwIC2pA5qaBwopzra3p7ugdQ&ust=1364346928342081>  
Acesso em 14/02/2013.

HANCKE, G. P. **The Measurement Of The Relative Density Of Homogeneous Fluids By Means Of An Optical Technique.** Department of Electrical & Electronic Engineering University of Pretoria, PRETORIA, Republic of South Africa, 2002.

HANCKE, G. P. **A Fiber-optic Density Sensor for Monitoring the State-of-Charge of a Lead Acid Battery.** IEEE 1990

HECHT, E. **Optics.** Pearson Education Inc., San Francisco, 1931.

IBP. **Medição de Densidade.** Rio de Janeiro, 1984.

IMAGENS GOOGLE. Disponível em: <[http://www.google.com.br/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=images&cd=&cad=rja&docid=lbk4F8KB3A0GIM&tbnid=ZX3vrLa\\_J78a0M:&ved=0CAMQjhw&url=http%3A%2F%2Fportal.doprofessor.mec.gov.br%2FfichaTecnicaAula.html%3Faula%3D26697&ei=GmVvUcLVPIsu9AS2yoG4DA&psig=AFQjCNHxHUFVulHQzuzKmx4z5OfRuHzg&ust=1366341263867500](http://www.google.com.br/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=images&cd=&cad=rja&docid=lbk4F8KB3A0GIM&tbnid=ZX3vrLa_J78a0M:&ved=0CAMQjhw&url=http%3A%2F%2Fportal.doprofessor.mec.gov.br%2FfichaTecnicaAula.html%3Faula%3D26697&ei=GmVvUcLVPIsu9AS2yoG4DA&psig=AFQjCNHxHUFVulHQzuzKmx4z5OfRuHzg&ust=1366341263867500)>  
Acesso em 3/03/2013.

LIRA, F.A.de. **Metrologia na Indústria.** Editora Érica, São Paulo, 2001.

LAÇOS DE HISTERESE 1. Disponível em: <[http://www.google.com.br/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=images&cd=&cad=rja&docid=to7kZK8UnS1h0M&tbnid=40xhO\\_dOaNoc4M:&ved=0CAMQjhw&url=http%3A%2F%2Fwww.dsce.fee.unicamp.br%2F~antenor%2Fhtmlfile%2FCAP7%2Fcap7.html&ei=IFxGUdmMDoX48wTb-4GwCA&bvm=bv.43828540,d.dmQ&psig=AFQjCNHWjibPCiXYWSAftVGcSQaTNzuQBg&ust=1363651893729468](http://www.google.com.br/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=images&cd=&cad=rja&docid=to7kZK8UnS1h0M&tbnid=40xhO_dOaNoc4M:&ved=0CAMQjhw&url=http%3A%2F%2Fwww.dsce.fee.unicamp.br%2F~antenor%2Fhtmlfile%2FCAP7%2Fcap7.html&ei=IFxGUdmMDoX48wTb-4GwCA&bvm=bv.43828540,d.dmQ&psig=AFQjCNHWjibPCiXYWSAftVGcSQaTNzuQBg&ust=1363651893729468)> Acesso em 23/03/2013.

LAÇOS DE HISTERESE 2. Disponível em: Disponível em: <[http://www.google.com.br/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=images&cd=&cad=rja&docid=Cpjidtq\\_gQGyUM&tbnid=dyLUyrynArdiM:&ved=0CAMQjhw&url=http%3A%2F%2Fwww.scielo.br%2Fscielo.php%3Fpid%3DS14153662011001200013%26script%3Dsci\\_arttext&ei=01tGUdG1B4\\_49gSD\\_oDgCg&bvm=bv.43828540,d.dmQ&psig=AFQjCNHWjibPCiXYWSAftVGcSQaTNzuQBg&ust=1363651893729468](http://www.google.com.br/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=images&cd=&cad=rja&docid=Cpjidtq_gQGyUM&tbnid=dyLUyrynArdiM:&ved=0CAMQjhw&url=http%3A%2F%2Fwww.scielo.br%2Fscielo.php%3Fpid%3DS14153662011001200013%26script%3Dsci_arttext&ei=01tGUdG1B4_49gSD_oDgCg&bvm=bv.43828540,d.dmQ&psig=AFQjCNHWjibPCiXYWSAftVGcSQaTNzuQBg&ust=1363651893729468)> Acesso em 23/03/2013.

MARTÍNEZ-REINA, M. D.; AMADO-GONZÁLEZ, E. **Índices de refracción y densidad de mezclas binarias de heptano con ciclohexano, benceno y tolueno**

**a 293.15, 298.15, 303.15 y 308.15 K/ Refraction indexes and density for binary mixtures of heptane with cyclohexane, benzene and toluene at 293.15, 298.15, 303.15 K/ Índices de refração e densidade de misturas binárias de heptano com ciclo-hexano, benzeno e tolueno a 293.15, 298.15, 303.15 e 308.15 K.** 2012 Jun. Disponível em: < [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0121-7092012000100011&lang=pt](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-7092012000100011&lang=pt) > acesso em 02/03/2012.

MOATTAR M. T. Z.; CEGINCARA, R. M. **Viscosity, Density, Speed of Sound, and Refractive Index of Binary Mixtures of Organic Solvent + Ionic Liquid, 1-Butyl-3-methylimidazolium Hexafluorophosphate at 298.15 K.** Physical Chemistry Department, Faculty of Chemistry (Excellence of Science for New Materials and Clean Chemistry) University of Tabriz, Tabriz, Iran.

Optical Fiber Sensor for Measuring Refractive Index. Disponível em: < <http://jjap.jsap.jp/link?JJAP/21/1509/> > Acesso em 02/03/2013.

PCE. Medidores. Disponível em: < <http://www.pce-medidores.com.pt/medicoes/refratometros.htm> > Acesso em: 20/03/2013.

PLANETSEED. Disponível em <[http://www.planetseed.com/pt-br/posted\\_faq/50606](http://www.planetseed.com/pt-br/posted_faq/50606)> Acesso em 20/03/2013.

PEDROTTI, F. **Introduction to optics.** Pearson Education Inc., New Jersey, 1932

POSSETI, G. R. C.; CAMILOTTI, E.; MULLER, M.; FABRIS, J. L. **Long Period Grating Transducer for Measurement of Ethanol Concentration in Water Solution.** Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2009.

POSSETI, G. R. C.; CAMILOTTI, E.; MULLER, M.; FABRIS, J. L. **Sensing ethanol-blended gasoline with long- period fiber grating: a metrological perspective.** Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2013.

RIBEIRO, R.A.S. **Refratômetros por ondas evanescentes em guias de ondas planares.** Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

RONZELLI, J. **Unidades de medida**. Scientia Agraria.Vol.1, n1. 2000.  
<http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/agraria/article/viewArticle/970>

SMAR. Disponível em: < <http://www.smar.com/newsletter/marketing/index13.html> >  
Acesso em 2/03/2013.

TERADA, G. G. **Caracterização e Aplicação de Sensores à Fibra Ótica no Setor Petroquímico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Curitiba, 2010.

TIPLER, P.A.; MOSCA, G. **Física para cientistas e engenheiros**. Volume 1.LTC,  
Rio De Janeiro,1933.

TURIN, J.; CAROME, E. F.; OVSENIK,C. **Fiber Optic Refractometer for Liquid Index of Refraction Measurements**. 2001.

WIXWAT, Y. FU; J. R. STEVENS, J.R. **Index of refraction, density and viscosity measurements of poly(propylene glycol)-salt complexes**. Guelph Waterloo Program for Graduate Work in Physics, Guelph Campus, University of Guelph, Guelph, Ontario, Canada NIG 2W1 (Received 2 February 1990; revised 25 April 1990, accepted 17 May 1990).

UNED. Refratometria. Disponível em: <<http://www.uned.es/094258/contenido/tecnicas/refractometria/refractometria.htm> > Acesso em 10/01/2013.