



DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE SENSORES A FIBRA ÓPTICA  
PLÁSTICA PARA REFRACTOMETRIA BASEADOS EM MODULAÇÃO DE  
AMPLITUDE

Domingos Marcelus Carias Rodrigues

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Marcelo Martins Werneck

Rio de Janeiro

Abril de 2013

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE SENSORES A FIBRA ÓPTICA  
PLÁSTICA PARA REFRACTOMETRIA BASEADOS EM MODULAÇÃO DE  
AMPLITUDE

Domingos Marcelus Carias Rodrigues

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO  
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA  
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE  
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE  
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Examinada por:

---

Prof. Marcelo Martins Werneck, Ph.D.

---

Prof. Antonio Petraglia, Ph.D.

---

Prof. Marcos Tadeu D'Azeredo Orlando, Ph.D.

---

Prof. José Luiz da Silva Neto, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

ABRIL DE 2013

Rodrigues, Domingos Marcelus Carias

Desenvolvimento e Caracterização de Sensores a Fibra Óptica Plástica para Refratometria Baseados em Modulação de Amplitude/ Domingos Marcelus Carias Rodrigues. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2013.

XV, 123 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Marcelo Martins Werneck

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Elétrica, 2013.

Referencias Bibliográficas: p. 74-78.

1. Sensores a Fibra Óptica. 2. Refratometria. 3. Campo Evanescente. I. Werneck, Marcelo Martins. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

# **Dedicatória**

Dedico esta dissertação a Vanise e a Rebeca, as minhas amadas esposa e filha, que mesmo sem conhecer o conteúdo deste trabalho, foram indispensáveis para sua construção. Sem a presença constante, o incentivo, o amor, a alegria e a companhia de vocês seria impossível resistir até o fim.

# Agradecimentos

Ao meu Senhor Eterno, Cristo Jesus, razão da minha existência, por me capacitar e permitir fazer ciência sem abdicar da fé.

A minha família, pais, irmãos, tios, primos, cunhados, enfim, todos estes que me acompanham a tantos anos e sempre torcem por mim.

Ao meu orientador, professor Marcelo Marins Werneck, pelas idéias e apoio constante em todo o desenvolvimento do trabalho. Agradeço pela visão e experiência para realizar mudanças em momentos cruciais nesta etapa da minha vida profissional.

Ao professor Paulo Roberto Guimarães Couto, do Inmetro, pelo incentivo e constante disposição em ensinar e colaborar na elaboração das análises experimentais.

A toda a equipe do Laboratório de Instrumentação e Fotônica pelo auxílio na produção deste trabalho, em especial a Gisele, a Regina e a Marceli pela ajuda na realização dos experimentos.

Enfim, aos meus amigos e irmãos, que me sustentam com palavras e orações.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE SENSORES A FIBRA ÓPTICA  
PLÁSTICA PARA REFRACTOMETRIA BASEADOS EM MODULAÇÃO DE  
AMPLITUDE

Domingos Marcelus Carias Rodrigues

Abril/2013

Orientador: Marcelo Martins Werneck

Programa: Engenharia Elétrica

O desenvolvimento de sensores a fibra óptica trouxe mudanças significativas na área de instrumentação e medição. Considerando-se as vantagens da utilização da fibra, através da modificação das suas características de propagação da luz, potencializou-se a utilização das fibras como elemento sensor. A medição de índice de refração é um dos processos em que a fibra óptica tem sido aplicada, tanto na área industrial quanto científica. No presente trabalho são estudados e implementados quatro tipos de sensores ópticos com fibras ópticas plásticas moldadas em forma de U, com diferentes diâmetros. Este estudo servirá para a determinação da concentração de bactérias patogênicas em amostras de água através da variação do índice de refração que elas provocam. Soluções de sacarose são utilizadas como referência para os valores de índice de refração medidos pelo sensor durante o processo experimental. No setup implementado, um LED acoplado a fibra recebe um sinal senoidal gerado pelo Simulink<sup>®</sup>, simulador do Matlab<sup>®</sup>, que também captura o sinal de um fotodiodo colocado do lado oposto da fibra. O Simulink<sup>®</sup> se comunica com o circuito através de uma placa de aquisição de sinais. Este sinal é rastreado e recuperado sem interferências por um *Lock-In* implementado no Simulink<sup>®</sup>, evitando assim que interferências luminosas externas afetem o sinal emitido, alterando o resultado da variação de tensão. Esta variação de tensão é associada a variação do índice de refração das soluções. Os resultados encontrados apresentam uma repetitividade da ordem de  $10^{-4}$  unidades de índice de refração.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

DEVELOPMENT AND CHARACTERIZATION OF PLASTIC OPTICAL FIBER  
SENSORS FOR REFRACTOMETRY BASED ON AMPLITUDE MODULATION

Domingos Marcelus Carias Rodrigues

April/2013

Advisor: Marcelo Martins Werneck

Department: Electrical Engineering

The development of optical fiber sensors brought significant changes to instrumentation and measurement fields. Considering the advantages when using optical fibers, through the modification of their light propagation aspects, the employment of optical fibers as sensing elements have been boosted. The index of refraction measurement is one of the processes in which optical fibers have been employed, both in industrial and scientific areas. In this work, four U-shaped optical sensors developed using plastic optical fibers are studied and implemented. This study used for the determination of the concentration of pathogenic bacteria in water samples through the variation of the index of refraction of the environment, which is caused by these cells. Sucrose solutions were used as a reference for index of refraction values measured by the sensor during the experimental procedure. Bearing in mind the implemented measurement set-up, a LED connected to the fiber receives a sine waveform generated using the Simulink®, a simulation platform provided by Matlab®, which also captures the photodiode output signal, which is located on the opposite fiber end. The Simulink® communicates with the circuit through an acquisition board, this signal is tracked and recovered without noise by a Lock-in model also developed in Simulink®, thus avoiding external light interferences in the emitted signal which can alter the voltage variation response. This variation is calibrated according to the sucrose solutions index of refraction variation. The results present repeatability on the order of  $10^{-4}$  index of refraction units.

# Sumário

Lista de figuras .....	xi
Lista de tabelas .....	xiv
<b>Capítulo 1 Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação .....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Organização do trabalho .....	2
<b>Capítulo 2 Revisão bibliográfica .....</b>	<b>4</b>
2.1 Estado da arte.....	4
2.2 Princípio de funcionamento da fibra óptica.....	6
2.3 O campo evanescente .....	11
2.4 Atenuação da potência de saída na fibra óptica por reflexão total .....	14
2.5 A produção do <i>taper</i> .....	15
2.6 Atenuação da potência de saída na fibra óptica pela curva .....	16
<b>Capítulo 3 Análise das características do sensor .....</b>	<b>20</b>
3.1 Característica da potência de saída no sensor por perda através do campo evanescente .....	20
3.2 Característica da potência de saída com a variação do índice de refração na curva .....	21
<b>Capítulo 4 Metodologia e Montagem Experimental .....</b>	<b>24</b>
4.1 Fabricação dos sensores de POF em U.....	24
4.2 Processo de medição da luz usando o Amplificador <i>Lock-in</i> .....	27
4.3 Avaliação e expressão da incerteza de medição pelo ISO GUM 2008 .....	30
4.3.1 Definição do mensurando.....	32
4.3.2 Diagrama causa – efeito .....	34
4.3.3 Avaliação das incertezas – padrão.....	35
a) Avaliação da incerteza – padrão da concentração de sacarose.....	35
b) Avaliação da incerteza – padrão dos coeficientes do polinômio de ajuste.....	36
b.1) Coeficiente de determinação ( $R^2$ ) .....	36
b.2) Análise dos resíduos.....	36
b.3) Análise da variância .....	38
4.3.4 Cálculo dos coeficientes de sensibilidade .....	38
4.3.5 Componentes de incerteza .....	40
4.3.6 Cálculo da incerteza-padrão combinada.....	40
a) Incerteza combinada de fontes de entrada não correlacionadas .....	41
b) Incerteza combinada de fontes de entrada correlacionadas .....	41
<b>Capítulo 5 Resultados e discussões .....</b>	<b>43</b>



5.1	Experimento para validação das concentrações de sacarose como referência de índice de refração.....	43
5.1.1	Incerteza padrão das concentrações.....	43
5.1.2	Coeficientes de sensibilidade das concentrações.....	44
5.1.3	Componentes da incerteza das concentrações .....	45
5.1.4	Incerteza padrão combinada das concentrações .....	45
5.1.5	Estimativa da incerteza de medição do índice de refração .....	46
5.1.6	Incertezas–padrão dos coeficientes do polinômio .....	48
5.1.7	Coeficientes de sensibilidade dos índices de refração.....	49
5.1.8	Incerteza-padrão combinada dos índices de refração .....	49
5.2	Medições do índice de refração com sensores a fibra óptica .....	50
5.2.1	Avaliação das incertezas – padrão do sensor.....	53
5.2.2	Coeficientes de sensibilidade do sensor .....	56
5.2.3	Incerteza-padrão combinada do sensor.....	57
5.3	Comparação entre os sensores .....	58
5.3.1	Comparação das incertezas em volts .....	58
5.3.2	Comparação das incertezas em índice de refração .....	62
5.3.3	Comparação das sensibilidades .....	66
<b>Capítulo 6</b>	<b>Conclusão .....</b>	<b>71</b>
<b>Capítulo 7</b>	<b>Sugestões para trabalhos futuros .....</b>	<b>73</b>
<b>Capítulo 8</b>	<b>Referências bibliográficas.....</b>	<b>74</b>
<b>Anexo A</b>	<b>Resultados dos experimentos com sensores.....</b>	<b>79</b>
A.1	Tensões medidas pelos sensores de fibra de 1 mm com casca e com <i>taper</i> ....	79
A.2	Tensões medidas pelos sensores de fibra de 1 mm sem casca .....	81
A.3	Tensões medidas pelos sensores de fibra de 1 mm com casca e sem <i>taper</i> ....	84
A.4	Tensões medidas pelos sensores de fibra de 0,45 mm sem casca .....	86
<b>Anexo B.....</b>	<b>.....</b>	<b>89</b>
<b>Gráficos .....</b>	<b>.....</b>	<b>89</b>
B.1	Tensões em função do índice de refração dos sensores de fibra de 1 mm com casca e com <i>taper</i> .....	89
B.2	Tensões em função do índice de refração dos sensores de fibra de 1 mm sem casca.....	92
B.3	Tensões em função do índice de refração dos sensores de fibra de 1 mm com casca sem <i>taper</i> .....	95
B.3	Tensões em função do índice de refração dos sensores de fibra de 0,45 mm sem casca. ....	98
	Gráficos dos Resíduos das tensões medidas pelos sensores.....	101
B.4	Resíduos das tensões dos sensores de fibra de 1 mm com casca e com <i>taper</i> . ....	101

B.5 Resíduos das tensões dos sensores de fibra de 1 mm sem casca. ....	103
B.6 Resíduos das tensões dos sensores de fibra de 1 mm com casca e sem <i>taper</i> . .....	106
B.7 Resíduos das tensões dos sensores de fibra de 0,45 mm sem casca. ....	108
Gráficos dos Resíduos dos índice sde refração medidos pelos sensores.....	111
B.8 Resíduos dos índices de refração dos sensores de fibra de 1 mm com casca e com <i>taper</i> .....	111
B.9 Resíduos dos índices de refração dos sensores de fibra de 1 mm sem casca.	114
B.10 Resíduos dos índices de refração dos sensores de fibra de 1 mm com casca sem <i>taper</i> . ....	117
B.11 Resíduos dos índices de refração dos sensores de fibra de 0,45 mm sem casca. .....	120
<b>Anexo C Artigos publicados em congressos .....</b>	<b>123</b>

# Lista de figuras

Figura 2.1: Esquema explicativo da refração até a ocorrência da reflexão total da luz. Raio 1 com incidência normal, Raio 2 incidência oblíqua, Raio 3 incidência com o ângulo limite e Raio 4 ocorre reflexão total da luz..... 7

Figura 2.2: Representação da luz guiada na fibra óptica, indicando o ângulo máximo ( $\theta_{max}$ ) de acordo com a abertura numérica da fibra.  $\theta_0$  – ângulo de entrada da luz na fibra,  $\theta_1$  ângulo da luz dentro da fibra;  $\theta_i$  ângulo de incidência entre núcleo e casca;  $\theta_{crítico}$  – ângulo máximo para reflexão total. .... 8

Figura 2.3: Geometria da reflexão e refração de um raio de luz numa abordagem eletromagnética.  $k_i$  – direção de propagação da onda eletromagnética incidente e  $\theta_i$  ângulo de incidência.  $k_r$  – direção de propagação da onda eletromagnética refletida e  $\theta_r$  ângulo de reflexão.  $k_t$  – direção de propagação da onda eletromagnética transmitida e  $\theta_t$  ângulo de transmissão.  $n_1$  – índice do núcleo e  $n_2$  – índice da casca..... 9

Figura 2.4: Surgimento do campo evanescente durante a passagem da luz no guia de onda.  $k_i$  – direção de propagação da onda eletromagnética incidente e  $\theta_i$  ângulo de incidência.  $k_r$  – direção de propagação da onda eletromagnética refletida e  $\theta_r$  ângulo de reflexão.  $k_t$  – direção de propagação da onda eletromagnética transmitida e  $\theta_t$  ângulo de transmissão.  $n_1$  – índice do núcleo e  $n_2$  – índice da casca. Figura adaptada [14]..... 12

Figura 2.5: Distância ou comprimento de Penetração ( $d_p$ ) determinada pela queda da intensidade do campo elétrico de  $1/e$  do valor na interface.  $E_0$  – amplitude do campo elétrico.  $n_1$  – índice do núcleo e  $n_2$  – índice da casca. Figura adaptada [18]..... 13

Figura 2.6: Perda de potência ao longo do guia de onda em função do diâmetro da fibra e dos índices de refração externo.  $I_0$  – potência de entrada;  $I$  – potência de saída.  $n_1$  – índice do núcleo e  $n_2$  – índice da casca;  $d$  – diâmetro do núcleo;  $d_e$  – diâmetro efetivo do núcleo. Figura adaptada [22]. .... 14

Figura 2.7: Esquemas de fibra ópticas com *taper*, contendo a amostras a serem analisadas. (a) *Taper* obtido pela corrosão da casca. (b) *Taper* obtido pela técnica pincel de chama. Figura adaptada [24]..... 16

Figura 2.8: Fibra em curva com variação do ângulo ( $\phi$ ).  $\rho$  – raio do núcleo;  $n_1$  – índice de refração da fibra;  $n_2$  – índice de refração do meio externo;  $R$  – raio da curva;  $r$  – distância entre o centro da curva e a luz guiada;  $z_p$  – distância de meio período entre sucessivas reflexões na fibra esticada..... 16

Figura 2.9: Destaque para os ângulos de reflexão dentro da fibra curvada. (i) reflexões alternando entre as superfícies externa e interna; (ii) reflexões na superfície externa; $\phi_P$ – ângulo entre duas reflexões consecutivas na superfície externa; $\theta_\phi$ – ângulo de reflexão na superfície externa; $\theta'_\phi$ – ângulo de reflexão alternando entre as superfícies interna e externa; $z$ – direção de propagação da luz. $n_1$ – índice de refração interno; $n_2$ – índice de refração externo. Adaptado de [19] .....	18
Figura 3.1: Característica da queda de potência normalizada na saída com a variação do índice de refração em função do campo evanescente numa fibra com diâmetro do núcleo igual a 1 mm. ....	21
Figura 3.2: Característica de potência normalizada na saída com a variação do índice de refração em função da curva na fibra com ângulo fixo de $180^\circ$ .....	23
Figura 4.1: (a) suporte para o sensor e placa com LED e fotodiodo; (b) placa com LED e fotodiodo; (c) Sensor e placa acoplados ao suporte. ....	24
Figura 4.2: (a) Equipamento desenvolvido para produzir sensores curvados. (b) Ampliação da área onde os sensores são curvados.....	25
Figura 4.3: Medidas médias dos sensores produzidos. (a) Sensor com fibra de 1 mm com e sem casca dobrados, com $R_i = 3,5$ mm e $R_e = 4,5$ mm. (b) Sensor com fibra de 1 mm com casca e <i>taper</i> dobrado, com $R_i = 3,4$ mm e $R_e = 4,3$ mm. (c) Sensor com fibra de 0,45 mm sem casca dobrada, com $R_i = 4,05$ mm e $R_e = 4,5$ mm. ....	26
Figura 4.4: Ampliação da deformação causada no processo de afinamento da fibra com casca de 1 mm, visualizada pelo microscópio.....	27
Figura 4.5: Diagrama de blocos do experimento realizado para medição do índice de refração com os sensores a fibra óptica .....	28
Figura 4.6: Esquema do Amplificador Lock-in implementado no Simulink® .....	29
Figura 4.7: Amplificador do sinal da saída do fotodiodo .....	30
Figura 4.8: Fluxograma dos experimentos realizados desde a preparação das soluções de sacarose para amostras até a comparação entre os 4 tipos de sensores .....	31
Figura 4.7: Diagrama causa-efeito da medição das concentrações .....	34
Figura 4.8: Diagrama causa-efeito da medição do índice de refração pelo refratômetro	34
Figura 4.9: Diagrama causa-efeito da medida de tensão .....	35
Figura 4.10: Diagrama causa-efeito da medida do índice de refração pelo sensor .....	35
Figura 4.11: Exemplos de gráficos de resíduos. (a) Resíduos sem anormalidades. (b) Dispersão dos resíduos aumenta com o eixo y. (c) resíduos de ajuste feito por uma reta quando seriam melhor resolvidos por uma curva. Figura adaptada [36].....	37

Figura 5.2: Índice de refração calculado pelo refratômetro em função das amostras de sacarose.....	47
Figura 5.3: Resíduos dos índices de refração medidos pelo refratômetro.....	48
Figura 5.5: Tensão em função do índice de refração do sensor 1 da fibra de 1 mm sem casca.....	53
Figura 5.6: Tensão em função do índice de refração ajustada por polinômio do 1º grau do sensor 1 da fibra de 1 mm sem casca.....	54
Figura 5.7: Resíduos das tensões em volts do sensor 1 da fibra de 1 mm sem casca.....	55
Figura 5.8: Resíduos dos índices de refração do sensor 1 da fibra de 1 mm sem casca.	56
Figura 5.9: Comparação das incertezas da medição em volts dos sensores com fibra de 1 mm com casca e com <i>taper</i> .....	60
Figura 5.10: Comparação das incertezas da medição em volts dos sensores com fibra de 1 mm com casca e sem <i>taper</i> .....	61
Figura 5.11: Comparação das incertezas da medição em volts dos sensores com fibra de 1 mm sem casca.....	61
Figura 5.12: Comparação das incertezas da medição em volts dos sensores com fibra de 0,45 mm sem casca.....	62
Figura 5.13: Comparação das incertezas da medição em índice de refração dos sensores com fibra de 1 mm com casca e com <i>taper</i> .....	64
Figura 5.14: Comparação das incertezas da medição em índice de refração dos sensores com fibra de 1 mm com casca e sem <i>taper</i> .....	64
Figura 5.15: Comparação das incertezas da medição em índice de refração dos sensores com fibra de 1 mm sem casca.....	65
Figura 5.16: Comparação das incertezas da medição em índice de refração dos sensores com fibra de 0,45 mm sem casca.....	65
Figura 5.17: Comparação da sensibilidade normalizada dos sensores com fibra de 1 mm com casca e com <i>taper</i> .....	67
Figura 5.18: Comparação da sensibilidade normalizada dos sensores com fibra de 1 mm com casca e sem <i>taper</i> .....	68
Figura 5.19: Comparação da sensibilidade normalizada dos sensores com fibra de 1 mm sem casca .....	68
Figura 5.20: Comparação da sensibilidade normalizada dos sensores com fibra de 0,45 mm sem casca.....	69

## Lista de tabelas

Tabela 5.1: Valores de referência das concentrações de sacarose.....	44
Tabela 5.2: Coeficientes de sensibilidade das concentrações de sacarose. ....	45
Tabela 5.3: Componentes das incertezas das concentrações de sacarose.....	45
Tabela 5.4: Incerteza-padrão combinada das concentrações de sacarose. ....	45
Tabela 5.5: Valores das concentrações de sacarose com incertezas.....	46
Tabela 5.6: Resultados dos índices de refração medidos no refratômetro .....	46
Tabela 5.7: Valores de referência para os índices de refração. ....	47
Tabela 5.8: Incerteza-parão dos coeficientes da curva do índice de refração .....	49
Tabela 5.9: Coeficientes de sensibilidade dos índices de refração.....	49
Tabela 5.10: Incerteza-padrão combinada dos índices de refração .....	50
Tabela 5.11: Resultado geral do experimento para validação das soluções de sacarose como referência de índice de refração. ....	50
Tabela 5.12: Tensões medidas pelo sensor 1 de fibra de 1 mm sem casca. ....	52
Tabela 5.13: Valores de referência das tensões do sensor 1 de fibra de 1 mm sem casca. .....	53
Tabela 5.14: Incerteza padrão dos coeficientes do polinômio do segundo grau de ajuste. .....	55
Tabela 5.15: Coeficientes de sensibilidade da tensão como mensurando. ....	56
Tabela 5.16: Coeficientes de sensibilidade do índice de refração do sensor como mensurando.....	57
Tabela 5.17: Incerteza-padrão combinada das tensões.....	57
Tabela 5.18: Incerteza-padrão combinada dos índices de refrações .....	57
Tabela 5.19: Resultado geral do sensor 1 da fibra de 1 mm sem casca. ....	58
Tabela 5.20: Incertezas da medição em volts dos sensores com fibra de 1 mm com casca e com <i>taper</i> .....	59
Tabela 5.21: Incertezas da medição em volts dos sensores com fibra de 1 mm sem casca .....	59
Tabela 5.22: Incertezas da medição em volts dos sensores com fibra de 1 mm com casca e sem <i>taper</i> .....	59
Tabela 5.23: Incertezas da medição em volts dos sensores com fibra de 0,45 mm sem casca.....	60

Tabela 5.24: Incertezas da medição em índice de refração dos sensores com fibra de 1 mm com casca e com <i>taper</i> .....	63
Tabela 5.25: Incertezas da medição em índice de refração dos sensores com fibra de 1 mm sem casca.....	63
Tabela 5.26: Incertezas da medição em índice de refração dos sensores com fibra de 1 mm com casca e sem taper .....	63
Tabela 5.27: Incertezas da medição em índice de refração dos sensores com fibra de 0,45 mm sem casca.....	63
Tabela 5.28: Sensibilidade normalizada (V/V) dos sensores com fibra de 1 mm com casca e com <i>taper</i> .....	66
Tabela 5.29: Sensibilidade normalizada (V/V) dos sensores com fibra de 1 mm com sem casca .....	66
Tabela 5.30: Sensibilidade normalizada (V/V) dos sensores com fibra de 1 mm com casca e sem taper .....	66
Tabela 5.31: Sensibilidade normalizada (V/V) dos sensores com fibra de 0,45 mm sem casca.....	67
Tabela 5.32: Comparação dos resultados médios de incertezas e sensibilidades dos sensores.....	69

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Motivação

O desenvolvimento de sensores tem se expandido rapidamente na área de instrumentação e medição. Os sensores a fibra óptica trouxeram mudanças significativas nesta área, considerando-se as vantagens da utilização da fibra, anteriormente explorada apenas como meio de comunicação.

Transdutores são sistemas de medição de uma forma de energia que está relacionada a outra através de uma relação conhecida. Os sensores, por outro lado são apenas a parte sensitiva dos transdutores [1]. Um sensor a fibra óptica pode ser definido como um dispositivo através do qual um mensurando físico, químico ou biológico, interage com a luz guiada pela fibra óptica (sensor intrínseco) ou com a luz guiada até a região de interação pela fibra óptica (sensor extrínseco), para produzir um sinal óptico que será análogo ao parâmetro que se pretende medir. Estes sensores são projetados de modo que o mensurando interaja com um ou mais parâmetros ópticos da luz, sejam eles intensidade, fase, polarização ou comprimento de onda [2].

Através da modificação das características de propagação da luz na fibra, potencializou-se a utilização das fibras como elemento sensor. O surgimento de configurações capazes de processar a radiação, mantendo-a guiada, permitiu a redução dos componentes ópticos tradicionais na implementação de sistemas, tornando atrativa a determinação remota de grandezas físicas por via óptica [3].

O interesse na medida de índice de refração abrange uma quantidade grande de aplicações, tanto na área industrial quanto científica. De maneira mais específica, esta variação no índice de refração pode estar associada a determinação da concentração de bactérias em amostras de água, pois a presença da bactéria interfere no índice de refração da água, alterando seu valor entre 1,33 e 1,39 [4][5].

Considerando que esta variação é pequena, faz-se necessário que o sensor possua uma incerteza na medida que possa identificar mudanças na água pela presença das bactérias. Assim, uma das principais motivações deste trabalho é medir com um sensor



a fibra óptica variações no índice de refração da água que possuam incertezas da ordem de grandeza de  $10^{-4}$  em índice de refração, valor este já informado por um refratômetro.

Os princípios físicos fundamentais para o funcionamento do sensor são a interação do meio a ser medido com o campo evanescente do guia de onda e também as mudanças provocadas no guia quando a fibra óptica é afinada ou dobrada. Esta interação modifica a amplitude da luz guiada, de acordo como o índice de refração do meio externo em que a fibra está exposta. Em trabalhos realizados no Laboratório de Instrumentação e Fotônica (LIF) da COPPE/UFRJ foi constatado que os sensores dobrados em forma de U apresentam resultados superiores aos sensores retos [4].

As soluções de sacarose tem sido utilizadas como referências de índice de refração. Em experimentos realizados no LIF foi constatado que com concentrações de 52%, 45%, 30%, 25% e 15% obtem-se os índices de refração de 1,39; 1,38; 1,37; 1,36 e 1,35 respectivamente, sendo 1,33 o já conhecido índice de refração da água pura [4][5]. A medida dos valores de índice de refração associado às soluções são relacionadas à variação da tensão de saída do transdutor.

## **1.2 Objetivos**

O presente trabalho tem como seus objetivos avaliar a influência do afinamento e da curvatura da fibra em quatro modelos de sensores a fibra óptica desenvolvidos para refratometria, caracterizando, comparando e avaliando suas sensibilidades e repetitividades.

## **1.3 Organização do trabalho**

No Capítulo 2 é realizada uma revisão bibliográfica, apresentando-se alguns resultados encontradas em pesquisas realizadas com fibras ópticas atuando como elemento sensor em refratometria. Em seguida é apresentado um estudo teórico sobre o funcionamento da fibra óptica com ênfase no campo evanescente, destacando-se os processos de atenuação de potência ao longo da fibra provocados pela fabricação de *tapers* e da curva na fibra.

A seguir no Capítulo 3 é feita uma análise preliminar das características do sensor a ser implementado, numa proposta de visualizar separadamente as influências do *taper*

e da curva anteriormente estudados. O resultado deste estudo aprecia percentualmente a influência destas duas características que no sensor estão presentes de maneira conjunta.

O Capítulo 4 apresenta a metodologia empregada na pesquisa, desde o processo de fabricação dos sensores, a montagem experimental, o processo de medição usando Amplificador *Lock-in*, até o processo de avaliação das incertezas nas medidas realizadas.

Em seguida no Capítulo 5 são apresentados os resultados dos experimentos e as discussões sobre a estimativa das incertezas dos resultados e comparações entre os sensores fabricados. As conclusões de todo o processo são apresentadas no Capítulo 6. Algumas conclusões abrem espaço para a ampliação da pesquisa, sendo assim, algumas sugestões para a continuidade da pesquisa em trabalhos futuros são apresentadas no Capítulo 7.

No Capítulo 8 tem-se as referências bibliográficas utilizadas neste trabalho. Para uma visualização mais simples dos experimentos e resultados, apenas um sensor é apresentado no desenvolvimento do trabalho, sendo os resultados dos demais sensores apresentados nas tabelas e nos gráficos dos Anexos A e B, respectivamente. No Anexo C encontram-se os artigos apresentados ao longo do projeto.

# Capítulo 2

## Revisão bibliográfica

### 2.1 Estado da arte

Desde sua descoberta na década de 1960 a fibra óptica tem sido estudada e aplicada como meio de transmissão [6]. Seja em pesquisas teóricas, nos sistemas de comunicações, ou em sensores, como é o caso deste trabalho, as fibras continuam tendo suas propriedades exploradas.

Durante anos os estudos se concentraram mais nas fibras de vidro, principalmente por possuírem melhores propriedades para transmissão. Entretanto, as fibras ópticas plásticas (POF) são mais baratas e mais fáceis de manusear [6], assim, estas tem sido exploradas na área de sensores. O estudo de novos materiais também tem facilitado o avanço desta pesquisa.

Uma das áreas de pesquisa para aplicações com fibras ópticas está na determinação do índice de refração dos líquidos. Neste caso, aumentar a precisão da medida dos índices de refração utilizando sensores ópticos é um dos objetivos das pesquisas desenvolvidas. Foram encontrados resultados com incertezas de  $2 \times 10^{-3}$  e  $5 \times 10^{-3}$  para índices de refração entre 1,30 e 1,59, sendo esta uma precisão suficiente para as indústrias que produzem líquidos como óleos, detergentes e sucos [6].

Uma maneira de aumentar a sensibilidade do sensor a fibra óptica é através da diminuição do diâmetro da fibra na área sensora, formando os chamados *tapers* na fibra. O desenvolvimento desta técnica também tem avançado consideravelmente. Diversos equipamentos têm sido desenvolvidos com o objetivo de controlar a diminuição do diâmetro da fibra em escalas micrométricas, conseguindo um melhor aproveitamento do sensor [7]. Estas técnicas são melhores conhecidas para as aplicações em fibras de sílica.

O conhecimento aprofundado das propriedades físicas da fibra são indispensáveis para o avanço da pesquisa em sensores. O estudo do campo evanescente, a relação entre os índices do núcleo e da casca da fibra, os efeitos do *taper* e da curva na fibra são temas investigados em pesquisas [8]. A variação destas propriedades e seus efeitos

como a mudança da potência de saída, ou do espectro da luz guiada são alguns dos itens estudados no desenvolvimento desses sensores.

Em relação a variação da potência transmitida, o estudo dos ângulos na produção dos *tapers* tem se mostrado bastante crítico na relação entre potência de entrada e de saída [9]. Estes estudos tem maior foco em fibras de sílica monomodo.

Um artifício utilizado para aumentar a sensibilidade do sensor é a associação de vários *tapers* na mesma fibra, tendo cada um destes *tapers* uma pequena região afinada [10]. Os resultados encontrados demonstram que o aumento do número destes pequenos *tapers* realmente aumenta a sensibilidade e torna os sensores menos frágeis, pois a região afinada é menor. Estes estudos ainda estão limitados às fibras de sílica, pela facilidade em controlar a produção dos *tapers*.

Existem basicamente duas maneiras de se produzir *tapers* nas fibras: são as técnicas de “*flame-brush*”, denominados “*tapers-FB*”, e por corrosão. Em um estudo teórico comparativo através de simulação, os resultados apresentados para a variação do índice de refração do meio externo à fibra mostraram que os *taper-FB* apresentam um melhor desempenho [11]. Em outro estudo observou-se também que na região de índice de refração entre 1,300 e 1,450 a curva é praticamente linear, sendo isto uma facilidade para a produção de sensores que trabalhem nesta região próxima ao índice de refração da água pura [12].

Em função da praticidade no manuseio e do baixo custo das fibras ópticas plásticas, o desenvolvimento de sensores usando fibras plásticas tem sido pesquisado em laboratórios interessados em aplicações de campo. A facilidade para dobrar estas fibras e sua utilização como sensores em fluidos tem sido investigada.

Uma aplicação prática para sensores a fibra óptica tem sido a detecção de bactérias em água, com os chamados biossensores. Este processo tem um papel crucial em análises clínicas, amostras de alimentos e determinação da qualidade de líquidos. A diminuição do tempo e do custo neste processo é de suma importância para a indústria. Biossensores a fibra óptica plástica representam uma boa alternativa para reduzir o tempo de detecção e análise e o custo de um equipamento portátil [13].

Vários tipos de sensores biológicos ópticos em campo evanescente têm sido pesquisados como: sensor por ressonância de plasmons superficiais (SPR); sensor por espelho ressonante; sensor por guias de ondas planares; sensor por interação antígeno-anticorpo [14]. Nos estudos de Valkenburg & Woldringh (1984) foi observado o índice de refração de 1,38 para uma pasta de bactérias. Este valor foi confirmado em pesquisas

recentemente realizadas [4][5]. Assim, é possível estabelecer uma relação entre a variação do índice de refração da água com a concentração de bactérias em água. Nestes estudos soluções de sacarose diluídas em água com concentrações diferentes foram utilizadas como referências de índices de refração. Assim, índices de refração de 1,39; 1,38; 1,37; 1,36 e 1,35 foram obtidos em soluções de sacarose nas concentrações de 52%, 45%, 30%, 25% e 15% respectivamente, sendo 1,33 o valor conhecido para o índice de refração da água pura.

Um equipamento foi desenvolvido para produção de *tapers* retos e dobrados em forma de U, visando sua análise e aplicação na detecção da variação da quantidade de bactérias em água associada à sua variação do índice de refração [15]. Este trabalho também utilizou soluções de sacarose para simular a variação da quantidade de bactérias em água.

Em uma análise realizada para comparação entre sensores retos e em curva [4], os sensores de fibras plásticas com *tapers* retos só detectaram diferentes índices de refração em diâmetros entre 0,40 e 0,54 mm. As mesmas fibras em forma de U tornaram-se sensíveis ao índice de refração mesmo que em diâmetros maiores de 0,57 mm. Recentemente foi apresentada a proposta de um sistema de detecção de bactérias em água baseado em índice de refração, com a utilização de anticorpos, dando continuidade aos estudos realizados no LIF [16].

## 2.2 Princípio de funcionamento da fibra óptica

De acordo com a teoria de Maxwell [17], a onda eletromagnética se propaga no vácuo com a velocidade  $c = 1/\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$ , onde  $\epsilon_0$  e  $\mu_0$  são a permissividade e a permeabilidade do vácuo respectivamente. Já em um meio material ela se desloca com  $v_n = 1/\sqrt{\epsilon\mu}$ , onde  $\epsilon$  e  $\mu$  são respectivamente a permissividade e a permeabilidade do meio. O índice de refração absoluto ( $n$ ) é então definido como

$$n = \frac{c}{v_n} = \sqrt{\frac{\epsilon\mu}{\epsilon_0\mu_0}} \quad (2.1)$$

Quando um raio de luz atravessa uma interface entre dois meios de índices de refração diferentes, representados nos raios 1 e 2 da Figura 2.1, ocorre o fenômeno

conhecido como refração. A Equação (2.2) é a lei da refração, conhecida como lei de Snell [18], onde  $n_1$  e  $n_2$  são os índices dos meios de incidência e refração, respectivamente, e  $\theta_i$  e  $\theta_t$  os ângulos de incidência e refração.

$$n_1 \text{sen} \theta_i = n_2 \text{sen} \theta_t \quad (2.2)$$

Um fenômeno importante ocorre quando a luz está atravessando de um meio mais denso para um meio menos denso. Dependendo do ângulo de incidência, de certa forma a refração deixa de ocorrer. Este fenômeno é conhecido como reflexão total da luz, representada na Figura 2.1 pelos raios 3 e 4. Utilizando-se a Equação (2.2) pode-se determinar um ângulo a partir do qual este fenômeno acontece [18]. Este é chamado ângulo crítico ( $\theta_c$ ), encontrado no caso em que se considera o ângulo da luz transmitida igual a  $90^\circ$  conforme Equação (2.3), representado no raio 3 da Figura 2.1.

$$\theta_c = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1} \quad (2.3)$$

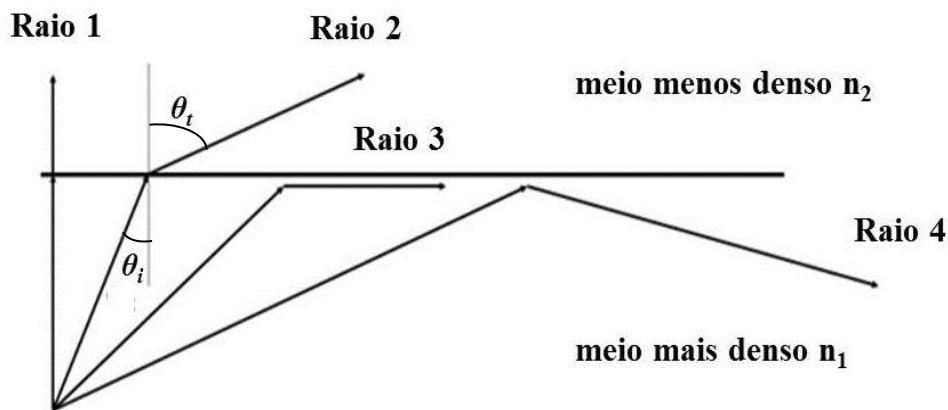
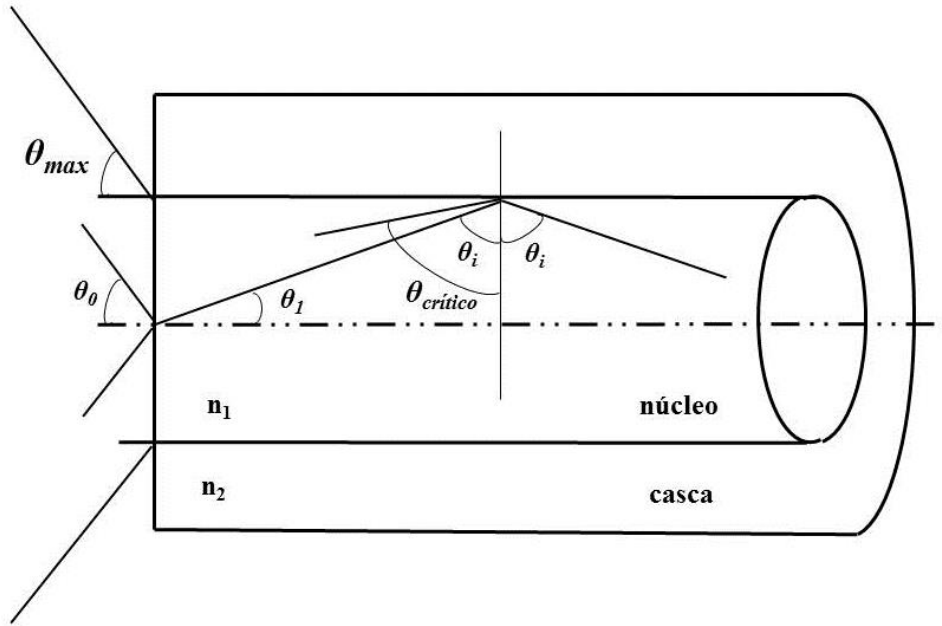


Figura 2.1: Esquema explicativo da refração até a ocorrência da reflexão total da luz. Raio 1 com incidência normal, Raio 2 incidência oblíqua, Raio 3 incidência com o ângulo limite e Raio 4 ocorre reflexão total da luz.

O princípio de funcionamento da fibra óptica utiliza este fenômeno da reflexão interna total (Figura 2.2). O núcleo e a casca da fibra possuem índices de refração diferentes, permitindo que a luz seja guiada no núcleo. Pode-se ainda determinar o ângulo máximo de entrada da luz na fibra, conhecido como abertura numérica (NA) conforme Equação (2.4).



**Figura 2.2:** Representação da luz guiada na fibra óptica, indicando o ângulo máximo ( $\theta_{max}$ ) de acordo com a abertura numérica da fibra.  $\theta_0$  – ângulo de entrada da luz na fibra,  $\theta_1$  ângulo da luz dentro da fibra;  $\theta_i$  ângulo de incidência entre núcleo e casca;  $\theta_{critico}$  – ângulo máximo para reflexão total.

$$NA = \text{sen}\theta_{m\acute{a}x} = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} \quad (2.4)$$

Existe também o parâmetro  $V$ , definido pela Equação (2.5), muito utilizado nos estudos e na classificação das fibras ópticas [19]. Ele determina o número de modos propagantes na fibra.

$$V = \frac{2\pi\rho}{\lambda} \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} \quad (2.5)$$

Observa-se a relevância do comprimento de onda da luz guiada ( $\lambda$ ) e do raio do núcleo ( $\rho$ ). No caso das fibras multimodo, que são objeto de estudo neste trabalho, tem-se o parâmetro  $V \gg 1$ .

Realizando-se uma abordagem eletromagnética da luz, pode-se detalhar o que acontece com a radiação eletromagnética ao atravessar uma interface plana para um meio com índice de refração diferente do qual vinha se propagando. Conforme mostra a Figura 2.3 a onda eletromagnética incidente que se propaga no meio  $n_1$ , seguindo na direção  $\mathbf{k}_i$ , com ângulo de incidência  $\theta_i$ , ao encontrar uma interface cujo índice de refração é diferente, parte desta onda será refletida na direção  $\mathbf{k}_r$ , com ângulo de

reflexão  $\theta_r$ . Observa-se também que parte da onda eletromagnética é transmitida pela superfície, passando a se propagar através do meio de índice de refração  $n_2$ , seguindo na direção de propagação  $\mathbf{k}_t$  com ângulo de transmissão  $\theta_t$  [20].

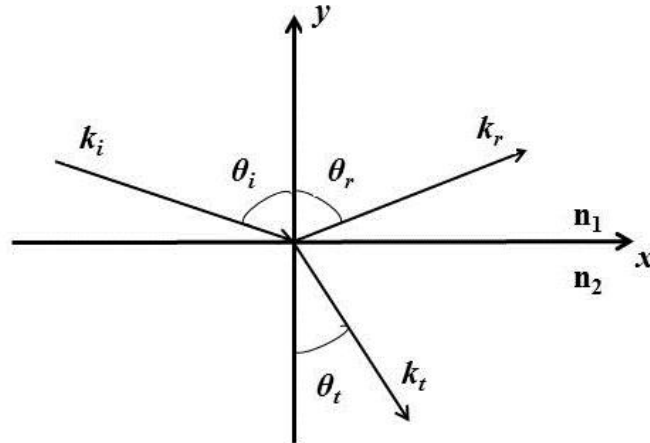


Figura 2.3: Geometria da reflexão e refração de um raio de luz numa abordagem eletromagnética.  $k_i$  – direção de propagação da onda eletromagnética incidente e  $\theta_i$  ângulo de incidência.  $k_r$  – direção de propagação da onda eletromagnética refletida e  $\theta_r$  ângulo de reflexão.  $k_t$  – direção de propagação da onda eletromagnética transmitida e  $\theta_t$  ângulo de transmissão.  $n_1$  – índice do núcleo e  $n_2$  – índice da casca.

A partir da equação da onda

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \exp i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t) \quad (2.6)$$

onde  $\mathbf{E}_0$  é a amplitude da onda e  $\mathbf{k}$  determina a direção de propagação, pode-se analisar os ângulos e as amplitudes dos campos elétricos transmitidos e refletidos.

Nessa abordagem, obtêm-se as conhecidas “Equações de Fresnel”, que determinam relações entre os campos elétricos transmitido e refletido com o campo elétrico incidente. As equações de Fresnel para a polarização no plano de incidência são [21]:

$$E_{0r} = \left( \frac{\alpha - \beta}{\alpha + \beta} \right) E_{0i}, E_{0t} = \left( \frac{2}{\alpha + \beta} \right) E_{0i} \quad (2.7)$$

com



$$\alpha \equiv \frac{\cos \theta_t}{\cos \theta_i} \quad (2.8)$$

e

$$\beta \equiv \frac{\mu_1 v_1}{\mu_2 v_2} = \frac{\mu_1 n_2}{\mu_2 n_1} \quad (2.9)$$

onde:

$E_{0i}$ ,  $E_{0r}$  e  $E_{0t}$  – amplitude do campo elétrico incidente, refletido e transmitido respectivamente.

$\theta_i$  e  $\theta_t$  – ângulos de incidência e transmitido respectivamente.

$\mu_1$  e  $\mu_2$  – permeabilidade dos meios 1 e 2 respectivamente. Pode-se considerar  $\mu_1 \approx \mu_2$ .

$v_1$  e  $v_2$  – velocidade da onda nos meios 1 e 2 respectivamente.

Observa-se na Equação (2.7) que as amplitudes dos campos transmitidos e refletidos dependem do  $\alpha$  que é função do ângulo de incidência, Equação (2.8), bem como dos índices de refração e da permeabilidade dos meios, Equação (2.9). Reescrevendo  $\alpha$  em função apenas do ângulo de incidência, tem-se

$$\alpha = \frac{\sqrt{1 - \text{sen}^2 \theta_t}}{\cos \theta_i} = \frac{\sqrt{1 - \left[ \left( \frac{n_1}{n_2} \right) \text{sen} \theta_i \right]^2}}{\cos \theta_i} \quad (2.10)$$

O “Vetor de *Poynting*” ( $\mathbf{S}$ ), informa a energia por unidade de tempo, por unidade área, ou seja, a potência por unidade de área, transportada a través de um campo, que se propaga na direção  $\mathbf{k}$ , sendo então definido como

$$\mathbf{S} \equiv \frac{1}{\mu} (\mathbf{E} \times \mathbf{B}) \quad (2.11)$$

A potência média por unidade de área transportada pela onda eletromagnética é chamada de intensidade ( $I$ ):

$$I \equiv \langle \mathbf{S} \rangle = \frac{1}{2} v \varepsilon E_0^2 \quad (2.12)$$

onde  $\epsilon$  é a permissividade do meio.

A partir do produto escalar de  $S$  pelo vetor unitário na direção de propagação, pode-se extrair a intensidade incidente

$$I_i = \frac{1}{2} \epsilon_1 v_1 E_{0_i}^2 \cos \theta_i \quad (2.13)$$

Analogamente, as intensidades transmitida e refletida são

$$I_r = \frac{1}{2} \epsilon_1 v_1 E_{0_r}^2 \cos \theta_r \text{ e } I_t = \frac{1}{2} \epsilon_2 v_2 E_{0_t}^2 \cos \theta_t \quad (2.14)$$

Definem-se então os coeficientes de reflexão (R) e transmissão (T) conforme as Equações abaixo. O coeficiente de transmissão será importante no estudo do comportamento da onda eletromagnética na fibra em curva.

$$R \equiv \frac{I_r}{I_i} = \left( \frac{E_{0_r}}{E_{0_i}} \right)^2 = \left( \frac{\alpha - \beta}{\alpha + \beta} \right)^2 \quad (2.15)$$

$$T \equiv \frac{I_t}{I_i} \equiv \frac{\epsilon_2 v_2}{\epsilon_1 v_1} \left( \frac{E_{0_t}}{E_{0_i}} \right)^2 \frac{\cos \theta_t}{\cos \theta_i} = \alpha \beta \left( \frac{2}{\alpha + \beta} \right)^2 \quad (2.16)$$

### 2.3 O campo evanescente

Observando-se o processo de reflexão total, é de se esperar que toda a luz emitida seja refletida no mesmo meio. Entretanto, não é exatamente isto que acontece. Tratando-se a luz através de uma abordagem eletromagnética, observa-se que ao assumir como nula a onda eletromagnética transmitida, torna-se impossível satisfazer as condições de contorno usando apenas as ondas incidente e refletida [18][19]. Entretanto, esta onda transmitida não pode transportar energia através da fronteira criada na interface dos materiais.

Uma maneira de se estudar este fenômeno é considerando a onda transmitida, Figura 2.4, como

$$\mathbf{E}_t = E_{0t} \exp i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t) \quad (2.17)$$

onde

$$\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} = k_{tx}x + k_{ty}y \quad (2.18)$$

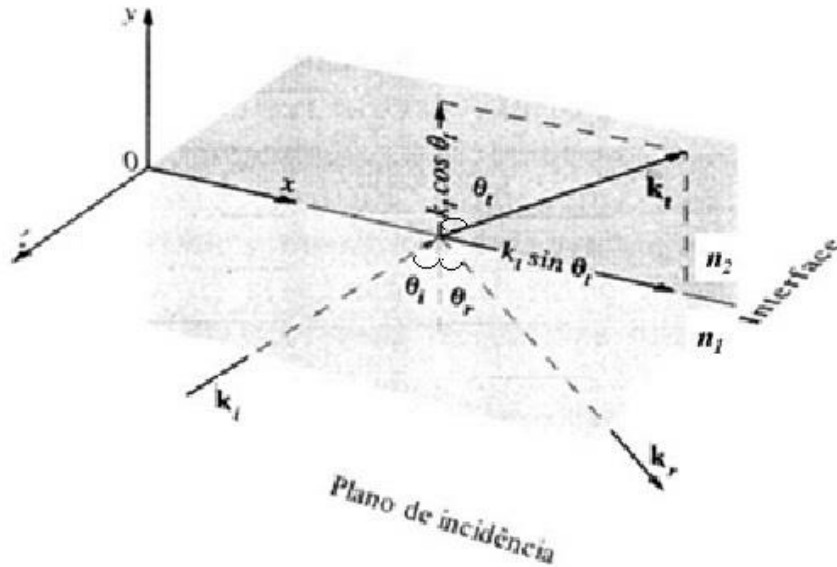


Figura 2.4: Surgimento do campo evanescente durante a passagem da luz no guia de onda.  $\mathbf{k}_i$  – direção de propagação da onda eletromagnética incidente e  $\theta_i$  ângulo de incidência.  $\mathbf{k}_r$  – direção de propagação da onda eletromagnética refletida e  $\theta_r$  ângulo de reflexão.  $\mathbf{k}_t$  – direção de propagação da onda eletromagnética transmitida e  $\theta_t$  ângulo de transmissão.  $n_1$  – índice do núcleo e  $n_2$  – índice da casca. Figura adaptada [14].

Observe-se que não existe componente  $z$  em  $\mathbf{k}$ , mas tem-se

$$k_{tx} = k_t \sin \theta_t \quad (2.19)$$

$$k_{ty} = k_t \cos \theta_t \quad (2.20)$$

Usando a lei de Snell (2.2), encontra-se

$$k_t \cos \theta_t = \pm k_t \sqrt{1 - \frac{n_1^2 \sin^2 \theta_i}{n_2^2}} \quad (2.21)$$

Considerando-se o caso para reflexão total, onde  $n_1 > n_2$ , o radical é negativo. Assim tem-se

$$k_{ty} = \pm i k_t \sqrt{\frac{n_1^2 \text{sen}^2 \theta_i}{n_2^2} - 1} \equiv \pm i \delta \quad (2.22)$$

e

$$k_{tx} = \frac{n_1 k_t}{n_2} \text{sen} \theta_i \quad (2.23)$$

Assim, substituindo em (2.17) tem-se

$$\mathbf{E}_t = \mathbf{E}_{0t} e^{\mp \delta y} e^{i(k_{tx} \frac{n_1 \text{sen} \theta_i}{n_2} - \omega t)} \quad (2.24)$$

Como a solução por exponencial positiva é fisicamente impossível, ela deve ser desprezada. Assim, temos uma onda cuja amplitude decai exponencialmente conforme penetra no meio menos denso.

A distância de penetração ( $d_p$ ), conhecida também como comprimento de penetração, é definida pelo valor em que o campo cai  $1/e$  do valor na interface, como mostra a Figura 2.5.

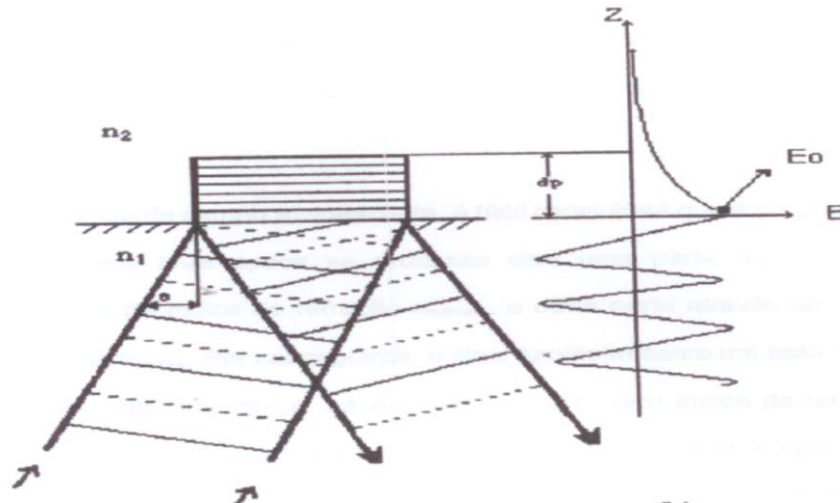


Figura 2.5: Distância ou comprimento de Penetração ( $d_p$ ) determinada pela queda da intensidade do campo elétrico de  $1/e$  do valor na interface.  $E_0$  – amplitude do campo elétrico.  $n_1$  – índice do núcleo e  $n_2$  – índice da casca. Figura adaptada [18]

Esta distância é dada pela Equação (2.25) onde  $\theta_i$  é o ângulo de incidência na interface e  $\theta_i > \theta_c$ ,  $\lambda_0$  é o comprimento de onda da luz no vácuo. Esta Equação pode ser também escrita como (2.26) onde  $k_0 = 2\pi/\lambda_0$  [22].

$$d_p = \frac{\lambda_0}{2\pi n_1 \sqrt{\sin^2 \theta_i - \sin^2 \theta_c}} \quad (2.25)$$

$$d_p = \frac{1}{k_0 \sqrt{n_1^2 \sin^2 \theta_i - n_2^2}} \quad (2.26)$$

## 2.4 Atenuação da potência de saída na fibra óptica por reflexão total

Uma das características ópticas utilizadas no sensor em estudo é a atenuação da potência de saída na fibra óptica por reflexão total. Assim, fez-se necessário conhecer o comportamento deste fenômeno na fibra.

A atenuação da luz guiada no núcleo depende da fração da potência total que é guiada na região do campo evanescente. Esta atenuação existente entre as potências de entrada ( $I_0$ ) e saída ( $I$ ) representadas na Figura 2.6 é definida pela Equação (2.27) [22].

$$I = I_0 \exp[-(r_f \alpha_m l C)] \quad (2.27)$$

onde os parâmetros  $\alpha_m$ ,  $l$  e  $C$  são definidos para o estudo de uma célula absorvedora, sendo  $\alpha_m$  o coeficiente de absorção molar,  $l$  o comprimento da célula,  $C$  a concentração química da célula e  $r_f$  representa o fator de redução ( $r_f < 1$ ) no coeficiente de atenuação ( $\alpha_m$ ) quando se usa guia de onda ao invés de uma célula de absorção direta.

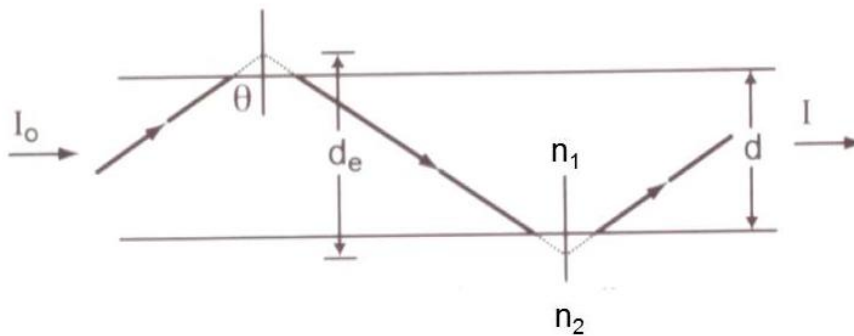


Figura 2.6: Perda de potência ao longo do guia de onda em função do diâmetro da fibra e dos índices de refração externo.  $I_0$  – potência de entrada;  $I$  – potência de saída.  $n_1$  – índice do núcleo e  $n_2$  – índice da casca;  $d$  – diâmetro do núcleo;  $d_e$  – diâmetro efetivo do núcleo. Figura adaptada [22].

Considerando-se que  $l$  e  $C$  são parâmetros fixos, pode-se analisar a atenuação através da variação de  $r_f$ . Em geral,  $r_f$  pode ser escrito como

$$r_f = \frac{n_2}{n_e} f \quad (2.28)$$

onde

$n_2$  – índice do absorvedor.

$n_e$  – índice efetivo da onda guiada ( $n_e = n_1 \sin \theta$ )

$f$  – fração da potência óptica total que interage com o absorvedor.

Como no caso em estudo não se conhece a distribuição do campo na guia de onda, não se pode calcular a fração de potência  $f$ . Alternativamente pode-se calcular  $r_f$  para uma guia plana através da perda por reflexão e multiplicando-se pelo número de reflexões por unidade de comprimento. Para uma fibra multimodo como na Figura 2.6,  $r_f$  é dado por [23]:

$$r_f = \frac{n_r}{k_0 n_e d_e \sqrt{n_e^2 - n_2^2}} \left[ \frac{n_1^2 - n_e^2}{n_1^2 - n_2^2} \right] \quad (2.29)$$

ou

$$r_f = \frac{n_2}{n_e} \left[ \frac{n_1^2 - n_e^2}{n_1^2 - n_2^2} \right] \frac{1}{1 + \pi R \sqrt{n_e^2 - n_2^2}} \quad (2.30)$$

onde  $d_e$  é o diâmetro efetivo,  $d_e = d + 2d_p$ , e  $R = d/\lambda$ .

## 2.5 A produção do *taper*

O processo de produção dos *tapers* visa a redução do diâmetro da fibra na região a ser utilizada como sensor. Desta forma o campo evanescente é exposto, entrando assim em contato com a amostra a ser analisada.

Os *tapers* podem ser produzidos através de um processo controlado de corrosão Figura 2.7(a) ou por uma técnica denominada “*flame-brush*” (pincel-de-chama) [24], em que se aquece uma região da fibra e depois se traciona até atingir o diâmetro desejado

Figura 2.7(b). É possível observar que o diâmetro do núcleo também diminui nos *tapers* produzidos pela técnica “*flame-brush*” o que aumenta a exposição do campo evanescente, colocando-o assim num maior contato com a amostra.

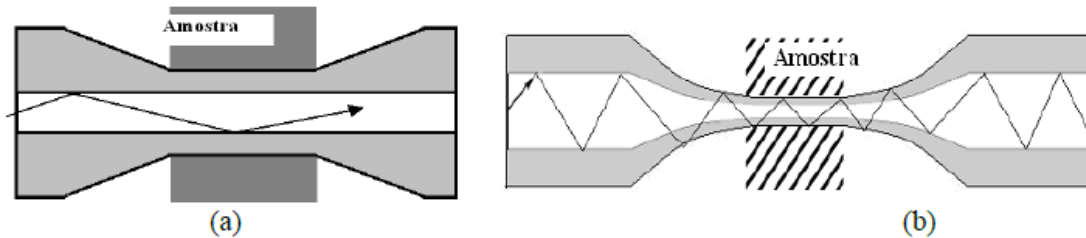


Figura 2.7: Esquemas de fibra ópticas com *taper*, contendo a amostras a serem analisadas. (a) *Taper* obtido pela corrosão da casca. (b) *Taper* obtido pela técnica pincel de chama. Figura adaptada [24].

## 2.6 Atenuação da potência de saída na fibra óptica pela curva

No sensor em estudo é considerada também a atenuação da potência óptica pela fibra curvada em relação a variação do índice de refração do meio externo. Todos os sensores produzidos são em forma de U, caracterizando uma curva fixa. Entretanto, é importante conhecer o comportamento da fibra em relação a variação no ângulo da curva. Daqui por diante apresenta-se a análise já desenvolvida para uma fibra em curva [19], conforme mostras a Figura 2.8.

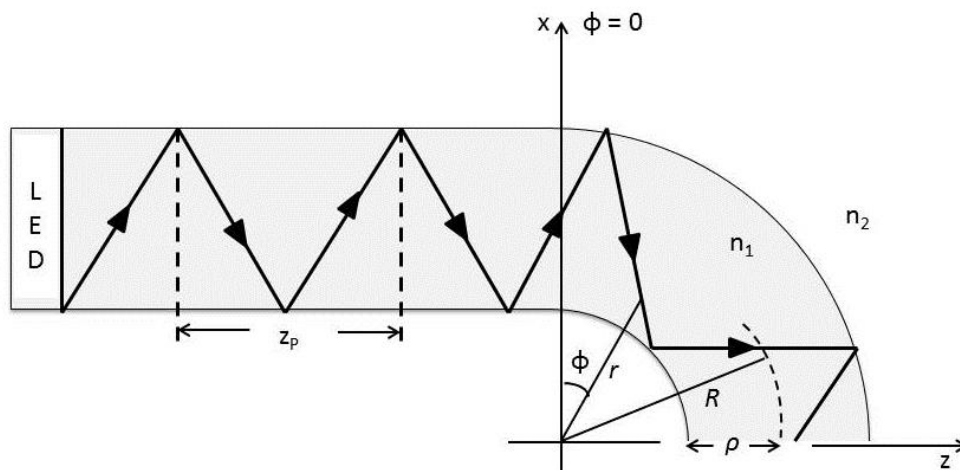


Figura 2.8: Fibra em curva com variação do ângulo ( $\phi$ ).  $\rho$  – raio do núcleo;  $n_1$  – índice de refração da fibra;  $n_2$  – índice de refração do meio externo;  $R$  – raio da curva;  $r$  – distância entre o centro da curva e a luz guiada;  $z_p$  – distância de meio período entre sucessivas reflexões na fibra esticada

A atenuação da potência ao longo da fibra na direção ( $z$ ) de propagação é descrita por

$$P(z) = P(0)\exp(-\gamma z) \quad (2.31)$$

onde  $\gamma$  é o coeficiente de atenuação determinado pela relação entre o valor médio do coeficiente de transmissão  $T$ , Equação (2.16), e pela distância de meio período entre sucessivas reflexões, denominado  $z_p$  [19].

$$\gamma = \frac{T}{z_p} \quad (2.32)$$

Por analogia, descreve-se a atenuação da potência ao longo da fibra curvada, em função do ângulo de curvatura  $\phi$  por

$$P(\phi) = P(0)\exp(-\gamma\phi) \quad (2.33)$$

onde, também por analogia, o coeficiente de atenuação  $\gamma$  agora se relaciona com o ângulo  $\phi_p$  (Figura 2.9) entre sucessivas cristas da onda, ou reflexões, em que há perda de potência. Assim

$$\gamma = \frac{T}{\phi_p} \quad (2.34)$$



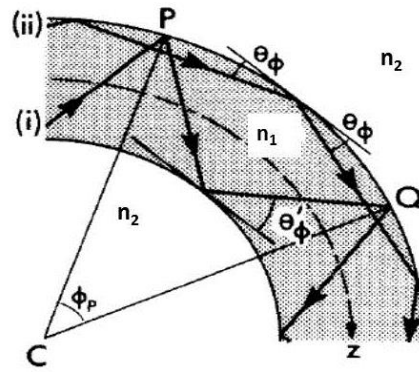


Figura 2.9: Destaque para os ângulos de reflexão dentro da fibra curvada. (i) reflexões alternando entre as superfícies externa e interna; (ii) reflexões na superfície externa;  $\phi_p$  – ângulo entre duas reflexões consecutivas na superfície externa;  $\theta_\phi$  – ângulo de reflexão na superfície externa;  $\theta'_\phi$  – ângulo de reflexão alternando entre as superfícies interna e externa; z – direção de propagação da luz.  $n_1$  – índice de refração interno;  $n_2$  – índice de refração externo. Adaptado de [19]

Para simplificar a análise, consideram-se as reflexões na superfície externa da curva. Assim temos

$$\phi_p = 2\theta_\phi \quad (2.35)$$

onde

$\theta_\phi$  – ângulo entre o caminho do feixe luminoso e a tangente da interface externa da curva.

O ângulo  $\theta_\phi$  se relaciona com o ângulo de incidência  $\theta_i$  através da expressão

$$\cos(\theta_\phi) = r_0 \cos(\theta_i) / (R + \rho) \quad (2.36)$$

logo

$$\theta_\phi = \cos^{-1}(r_0 \cos(\theta_i) / (R + \rho)) \quad (2.37)$$

onde  $R$  é o raio da curva,  $\rho$  é o raio do núcleo e  $r_0$  é o valor de  $r$  quando  $\phi = 0$ , de acordo com a Figura 2.8. Obtendo-se então  $T$  e  $\phi_p$  pode-se calcular o coeficiente de atenuação  $\gamma$  da Equação (2.34).

A potência total  $P_s$  em função da curva é encontrada integrando-se todos os raios. Assim,

$$P_s(\phi) = P(0) \int_{R-\rho}^{R+\rho} dr \int_{-\theta_c(r)}^{\theta_c(r)} \exp(-\gamma\phi) d\theta_i \quad (2.38)$$

onde, neste caso define-se

$$\theta_c(r) = \theta_c = \cos^{-1} \left( \frac{n_2}{n_1} \right) \quad (2.39)$$

Observa-se então a partir da Equação (2.38) que a potência de saída da luz guiada ao longo de uma fibra curvada sofre alterações dependendo do ângulo de inclinação da fibra. Esta informação é muito relevante, considerando-se que todos os sensores implementados neste trabalho utilizam fibras curvadas.

No próximo capítulo esta característica será estudada para uma fibra curvada com ângulo fixo de  $180^\circ$ , para observação da relação entre a potência de saída quando o índice de refração externo à fibra sofre mudanças.

## Capítulo 3

### Análise das características do sensor

A variação da potencia através da fibra pela mudança no campo evanescente e a variação da curva na fibra foram estudadas no capítulo 2. No presente capítulo, utilizando-se as equações encontradas, foi feita uma análise preliminar destas características. Considerando-se a dificuldade de se analisar a influência conjunta dos parâmetros campo evanescente e curva na fibra, apresenta-se a seguir uma proposta de modelagem para a resposta separada do sensor para cada uma destas características. Obviamente, como o objetivo deste trabalho não é o estudo de uma simulação, algumas simplificações foram realizadas. Os gráficos apresentados mostram a curva de tendência da característica em destaque. Estas curvas serão avaliadas para a aplicação de uma solução mais simples para os dados experimentais a serem encontrados.

#### 3.1 Característica da potência de saída no sensor por perda através do campo evanescente

Utilizando-se a Equação (2.26) do comprimento de penetração ( $d_p$ ) e conhecendo-se os parâmetros: diâmetro da fibra ( $d$ ), o comprimento de onda da luz guiada ( $\lambda$ ) e o índice de refração do núcleo da fibra ( $n_1$ ) característicos da fibra, pode-se escrever o fator de redução no coeficiente de atenuação  $r_f$ , descrito pela Equação (2.27), em função de  $n_2$ . Para facilitar a análise, neste caso, considera-se uma fibra sem casca, onde o diâmetro da fibra plástica é  $d = 1$  mm, com  $\lambda = 880$  nm, o que permite um valor fixo de  $R = d/\lambda$  na Equação (2.28).

Como  $n_e$  é função do ângulo de incidência,  $n_e = n_1 \sin \theta$ , pode-se desenhar a característica da variação de  $r_f$  em função da variação do índice externo ( $n_2$ ), conforme mostra a Figura 3.1, onde é utilizado o ângulo  $\theta_i = 70^\circ$ , por apresentar a maior perda de potência normalizada dentro da faixa permitida pelo ângulo limite.

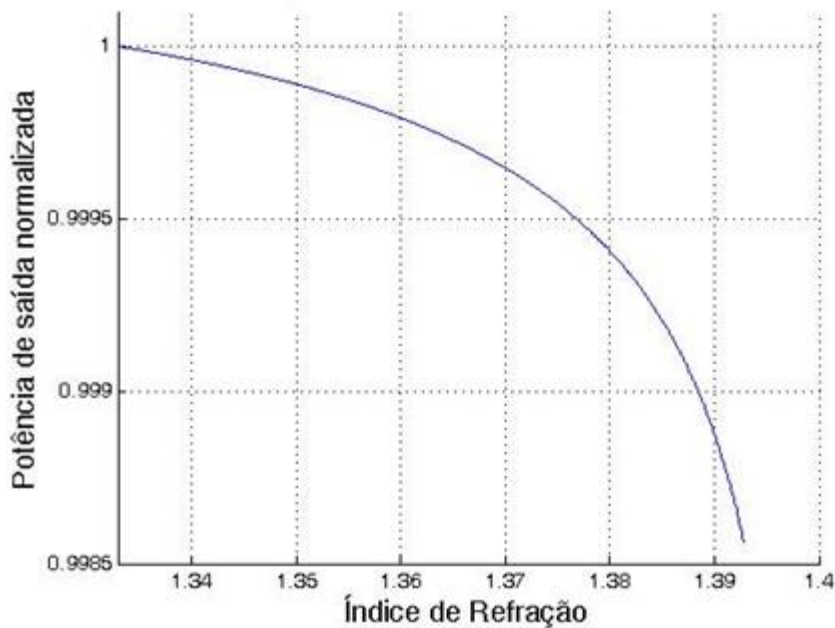


Figura 3.1: Característica da queda de potência normalizada na saída com a variação do índice de refração em função do campo evanescente numa fibra com diâmetro do núcleo igual a 1 mm.

Com a potência de entrada normalizada para o índice de refração da água igual a 1,33, observa-se uma atenuação de aproximadamente 0,15 % para a variação do índice de refração até 1,39.

### 3.2 Característica da potência de saída com a variação do índice de refração na curva

A integral que define a potência de saída, Equação (2.38), depende do coeficiente de atenuação  $\gamma$  determinado pela razão entre  $T$  e  $\phi_p$  segundo a Equação (2.34).

Considerando-se que no caso de uma fibra sem casca de 1 mm a razão  $r_0/(R+\rho)$  é aproximadamente um, tem-se da Equação (2.37) que

$$\theta_\phi = \cos^{-1}(\cos(\theta_i)) \quad (3.1)$$

Utilizando-se a Equação (2.25) encontra-se  $\phi_p$ .

O coeficiente de transmissão  $T$  é encontrado a partir da Equação (2.16), considerando-se que  $\alpha$  é função do ângulo de entrada. Integrando a Equação (2.38), tem-se

$$P_s(\phi) = P(0)[R + \rho - R + \rho][\theta_c + \theta_c] \exp(-\gamma\phi) \quad (3.2)$$

$$P_s(\phi) = 4P(0)\rho\theta_c \exp(-\gamma\phi) \quad (3.3)$$

Lembrando que  $\theta_c$  e  $\gamma$  dependem de  $n_1$  e  $n_2$  e, no caso em estudo,  $\phi = \text{cte} = \pi$ , pode-se calcular a potência em função do índice externo,  $P(n_2)$ . Assim,

$$P_s(n_2) = 4P(0)\rho\theta_c(n_2) \exp[-\gamma(n_2)\pi] \quad (3.4)$$

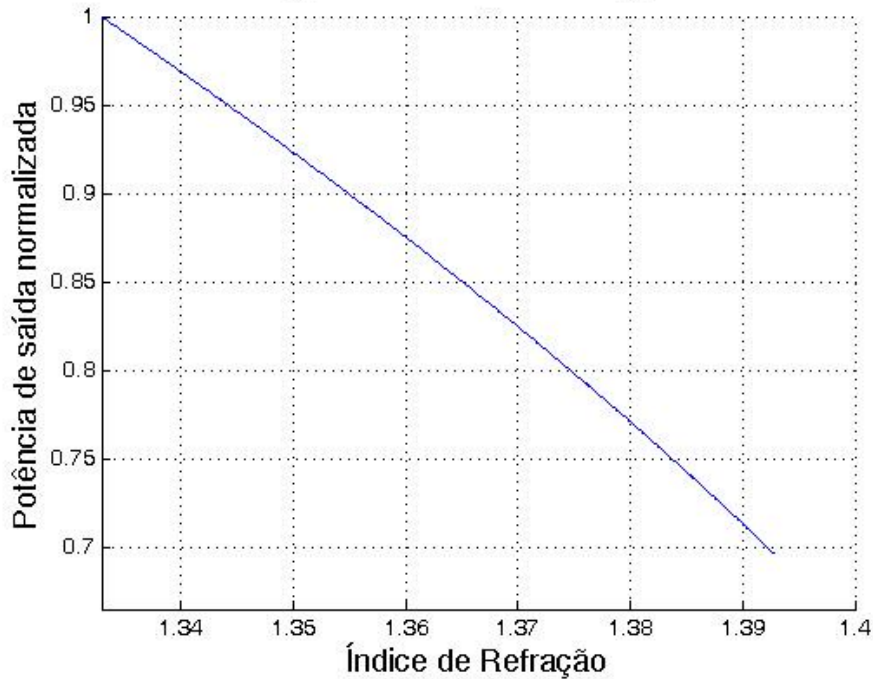
Observa-se ainda que, para uma saída normalizada, precisa-se calcular a potência inicial, ou seja, quando  $n_2$  é igual ao seu valor mínimo. Neste caso a potência de saída é máxima, igual a um. Assim

$$P(0) = P(n_{2_{min}}) \quad (3.5)$$

$$1 = 4P(n_{2_{min}})\rho\theta_c(n_{2_{min}}) \exp[-\gamma(n_{2_{min}})\pi] \quad (3.6)$$

$$P(n_{2_{min}}) = \frac{1}{4\rho\theta_c(n_{2_{min}}) \exp[-\gamma(n_{2_{min}})\pi]} \quad (3.7)$$

A Figura 3.2 mostra a atenuação da potência com o índice de refração normalizado para a água (índice de refração igual a 1,33). Observa-se uma atenuação de aproximadamente 30 % da entrada para a variação do índice até 1,39.



**Figura 3.2:** Característica de potência normalizada na saída com a variação do índice de refração em função da curva na fibra com ângulo fixo de 180°.

Observa-se neste capítulo que a atenuação de 30 % em relação a potência de entrada normalizada por conta da fibra estar curvada com um ângulo de 180° é bem mais significativa do que a atenuação de 0,15 % em relação a potência de entrada por conta da mudança do fator de redução ( $r_f$ ) no coeficiente de atenuação. Desta forma, mostra-se que a característica da fibra estar curvada é bem relevante para o sensor, sendo esta atenuação uma função quase linear.

## Capítulo 4

# Metodologia e Montagem Experimental

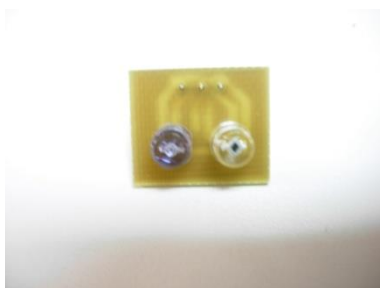
### 4.1 Fabricação dos sensores de POF em U

Os estudos realizados comprovaram que os sensores com as fibras dobradas são muito mais sensíveis do que os sensores com as fibras esticadas [4]. Assim, foi desenvolvido um equipamento para dobrar as fibras em forma de U, mantendo a repetitividade no processo. Todos os sensores estudados neste trabalho foram confeccionados desta forma.

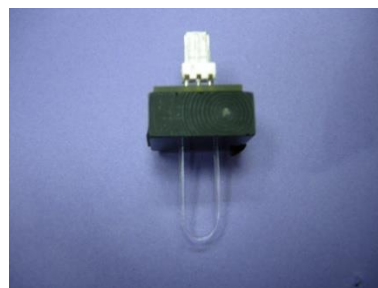
Para a realização dos experimentos foi produzido um suporte, Figura 4.1 (a) para acoplar o LED [25] e o fotodiodo [26] na entrada e na saída do sensor, respectivamente. A Figura 4.1 (b) mostra a placa desenvolvida para alimentar o LED e o fotodiodo. Ela acopla num dos lados no suporte conforme vista na Figura 4.1 (a) e o sensor encaixa no suporte pelo lado oposto, conforme indica a Figura 4.1 (c).



(a)



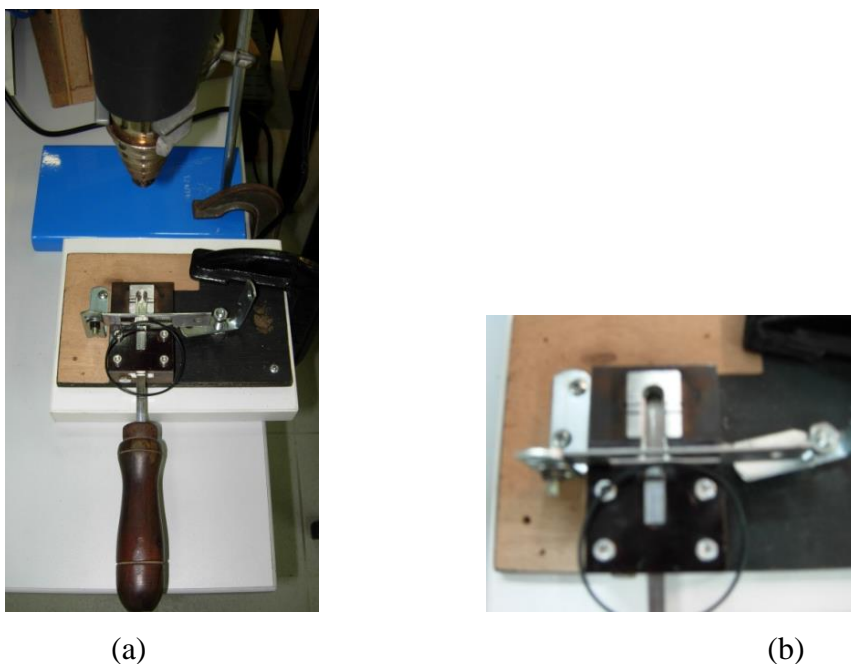
(b)



(c)

**Figura 4.1:** (a) suporte para o sensor e placa com LED e fotodiodo; (b) placa com LED e fotodiodo; (c) Sensor e placa acoplados ao suporte.

Os sensores em POF fabricados foram produzidos pela técnica de *flame-brush*, sendo que, considerando-se a utilização da fibra plástica, apenas um jato de calor foi suficiente para o derretimento parcial. Neste momento a fibra é então esticada em forma de U, utilizando-se o equipamento da Figura 4.2(a), com a placa de molde em destaque na Figura 4.2(b).



**Figura 4.2:** (a) Equipamento desenvolvido para produzir sensores curvados. (b) Ampliação da área onde os sensores são curvados.

Foram produzidos quatro tipos de sensores. Dois tipos utilizando-se fibras de 1 mm com casca, sendo um tipo de sensor com *taper* e outro sem *taper*. Outro tipo de sensor foi produzido utilizando-se fibra de 1 mm sem casca e o quarto tipo utilizando-se fibras de 0,45 mm sem casca.

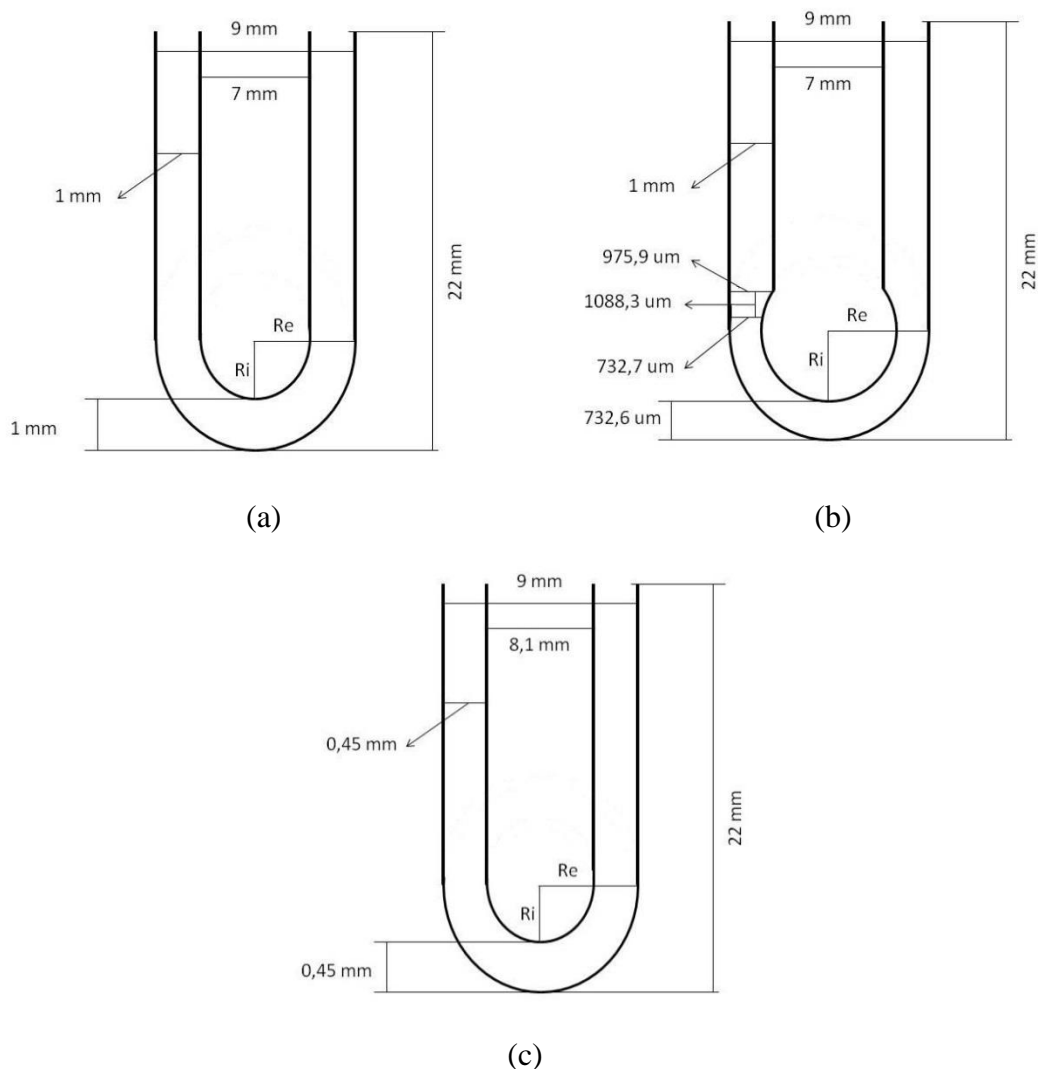
No processo de produção dos sensores o soprador térmico, colocado na posição *low*, foi posicionado 9 cm acima do molde. Um pedaço de fibra de aproximadamente 16 cm é então posicionado na parte metálica e o braço metálico móvel deslocado até a distância determinada pelo gabarito metálico. No caso dos sensores sem *taper*, a fibra foi posicionada no final do gabarito.

A placa metálica foi então apertada sem travar e a pistola acionada por 20 segundos. No caso dos sensores com fibras de 0,45 mm este tempo foi de 22 segundos. Somente 5 segundos após desligar a pistola o braço metálico é afastada. No caso das fibras de 0,45 mm este tempo foi estendido para 30 segundos. Segurou-se então as



pontas do sensor que estão fora do molde e o braço móvel foi então empurrado até o final. O sensor pronto foi então retirado e colocado num suporte para clivagem e polimento das pontas.

As medidas médias dos quatro tipos de sensores produzidos foram especificadas na Figura 4.3. A Figura 4.3 (a) representa as medidas dos sensores feito com fibras de 1 mm com casca [27] e sem casca, [28]. A Figura 4.3 (b) representa as medidas dos sensores com fibras de 1 mm com “taper” [27] e a Figura 4.3 (c) os sensores com fibras de 0,45 mm, [29]. Todas as medidas foram realizadas no microscópio [30]. Os raios internos (Ri) e os raios externos (Re) foram especificados para facilitar futuras simulações.



**Figura 4.3: Medidas médias dos sensores produzidos. (a) Sensor com fibra de 1 mm com e sem casca dobrados, com Ri = 3,5 mm e Re =4,5 mm. (b) Sensor com fibra de 1 mm com casca e taper dobrado, com Ri = 3,4 mm e Re =4,3 mm. (c) Sensor com fibra de 0,45 mm sem casca dobrada, com Ri = 4,05 mm e Re =4,5 mm.**

Na Figura 4.4 observa-se que no processo de produção do *taper* o afinamento por aquecimento causa uma pequena deformação na estrutura da fibra por ser afinada e dobrada ao mesmo tempo. As medidas dos *tapers* nos sensores ficarem bem similares, sendo assim observado que esta região de transição é bem crítica para a transmissão de luz.

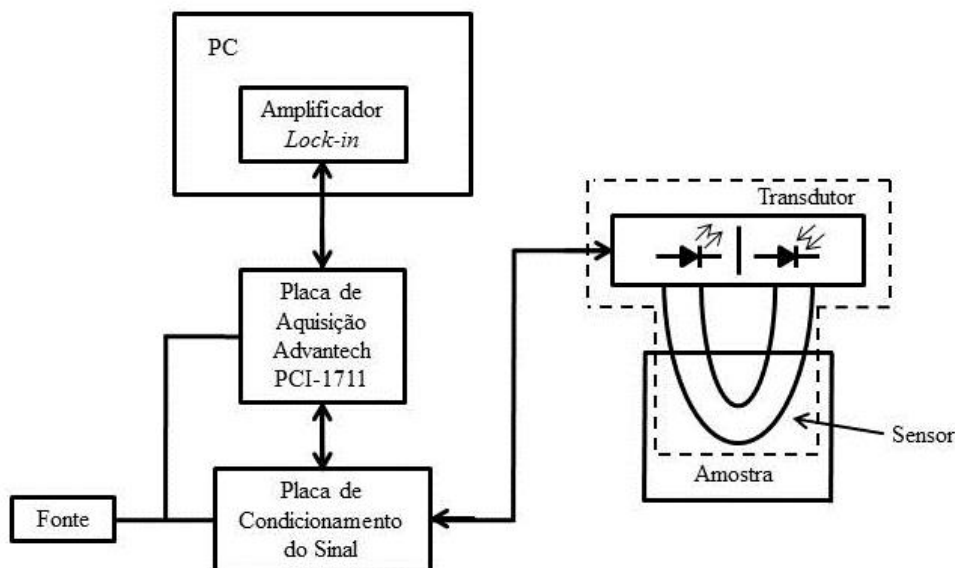


**Figura 4.4:** Ampliação da deformação causada no processo de afinamento da fibra com casca de 1 mm, visualizada pelo microscópio.

## 4.2 Processo de medição da luz usando o Amplificador *Lock-in*

Durante o processo de medida, o tempo total para produção de todas as amostras de sacarose para um experimento foi de aproximadamente 30 minutos, sendo as medidas realizadas imediatamente com o sensor. Estas soluções não podem ser reaproveitadas por conta da evaporação, assim, foram produzidas amostras de sacarose para o experimento com cada sensor, sendo o experimento realizado com apenas um sensor por dia.

A Figura 4.5 mostra um diagrama de blocos do experimento realizado para medição do índice de refração com os sensores a fibra óptica.



**Figura 4.5: Diagrama de blocos do experimento realizado para medição do índice de refração com os sensores a fibra óptica**

No *setup* implementado, um LED acoplado à fibra recebe um sinal senoidal gerado pelo Simulink<sup>®</sup>, simulador do Matlab<sup>®</sup> que também captura o sinal de um fotodiodo colocado do lado oposto da fibra. O Simulink<sup>®</sup> se comunica com o circuito através de uma placa de aquisição de sinais, Advantech PCI-1711 de 12 bits [31]. Este sinal é rastreado e recuperado sem interferências por um Amplificador *Lock-in* implementado no Simulink<sup>®</sup>, conforme mostra a Figura 4.6, evitando assim que interferências luminosas externas afetem o sinal emitido, que pode alterar o resultado da variação de tensão.

O sinal de entrada do Amplificador *Lock-in* proveniente do sistema físico é amplificado, visando melhorar o acoplamento com o detector sensível de fase (PSD) [32]. Este dispositivo é o responsável pela separação do sinal de interesse dos outros sinais como ruídos e interferências presentes na leitura. Um sinal de referência com grande precisão é necessário para a operação de multiplicação que é realizada dentro do PSD. Este sinal de referência é fornecido ao amplificador como uma tensão na mesma frequência do sinal a ser analisado, tendo também uma fase fixa em relação ao sinal de estudo. Para isso normalmente os sinais de entrada e referência são provenientes da mesma fonte.

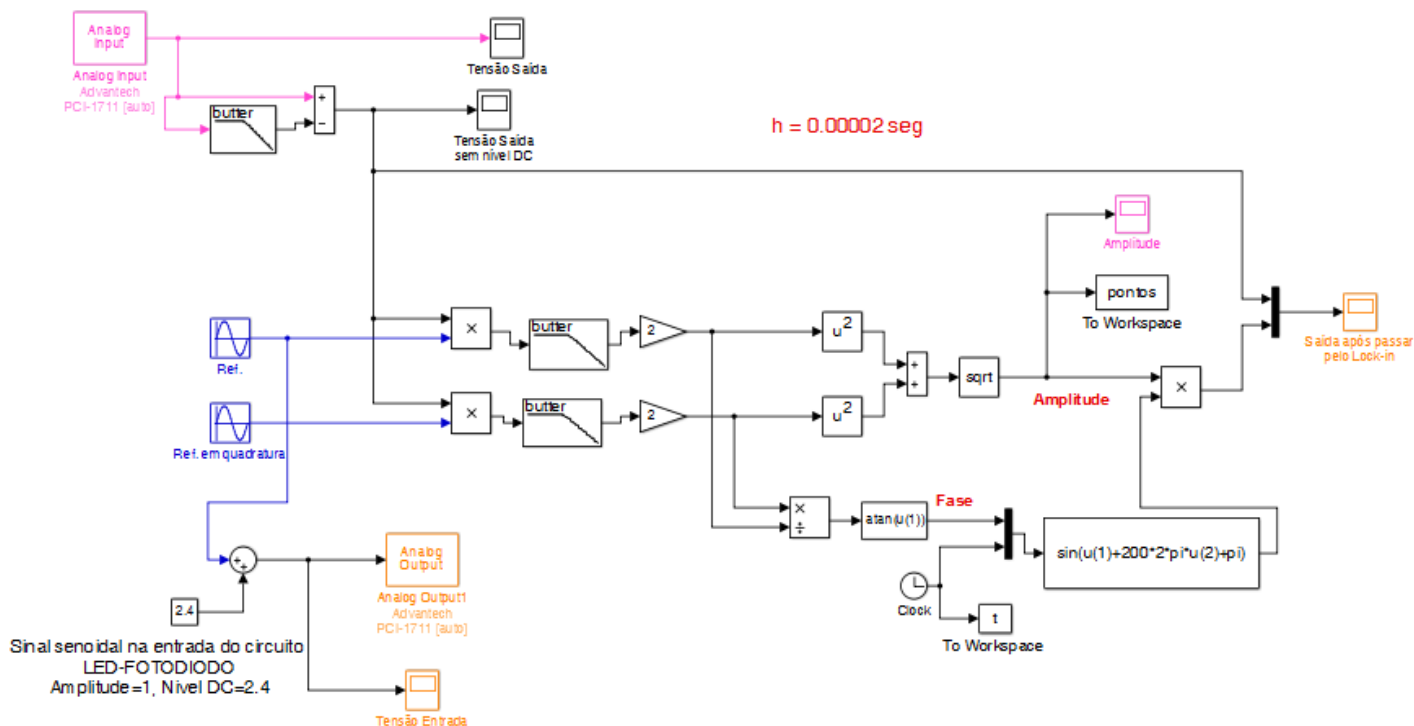


Figura 4.6: Esquema do Amplificador Lock-in implementado no Simulink®

No Amplificador *Lock-in*, diferente dos voltímetros, o ruído não é retificado e aparece na saída como uma flutuação AC. Assim, o sinal de entrada de interesse, uma vez convertido em nível DC, pode ser separado do ruído por meio do uso de um filtro *passa baixa* simples. Desta forma a leitura do sinal de saída ( $U_1$ ) no instrumento não é afetada pela presença de ruídos no sinal de entrada.

Na configuração do Amplificador *Lock-in* implementado, usa-se outro PSD com uma referência em quadratura, proporcionando um sinal de saída ( $U_2$ ) com defasagem. Se a fase do sinal muda, a amplitude do sinal  $R = \sqrt{U_1^2 + U_2^2}$  permanece constante. O filtro implementado no *Lock-in* é do tipo *passa-baixa butterworth*, de ordem  $n = 4$ , com frequência de corte  $\omega_c = 20 \times 2\pi$  rad/s. A frequência de referência foi  $\omega_R = 200 \times 2\pi$  rad/s, e a frequência de amostragem  $f_s = 1/h$ , onde, neste caso,  $h = 20 \mu\text{s}$ , foi igual a 50 Hz.

O LED posicionado na entrada da fibra e o fotodiodo posicionado na saída são alimentados por uma fonte de corrente controlada por um sinal senoidal gerado no Simulink®. O Simulink® gera uma tensão senoidal de 1,4V a 3,4V. Nesta faixa de valores o circuito se comporta linearmente, tendo as correntes correspondentes de 20 mA a 60 mA.

A luz propagada através da fibra, emitida pelo LED e recebida pelo fotodiodo, varia de intensidade na saída com a mudança do índice de refração em que o sensor está imerso, conforme analisado anteriormente. A tensão de saída do fotodiodo passa por um amplificador, representado na Figura 4.7 que é ajustado em função da fibra utilizada.

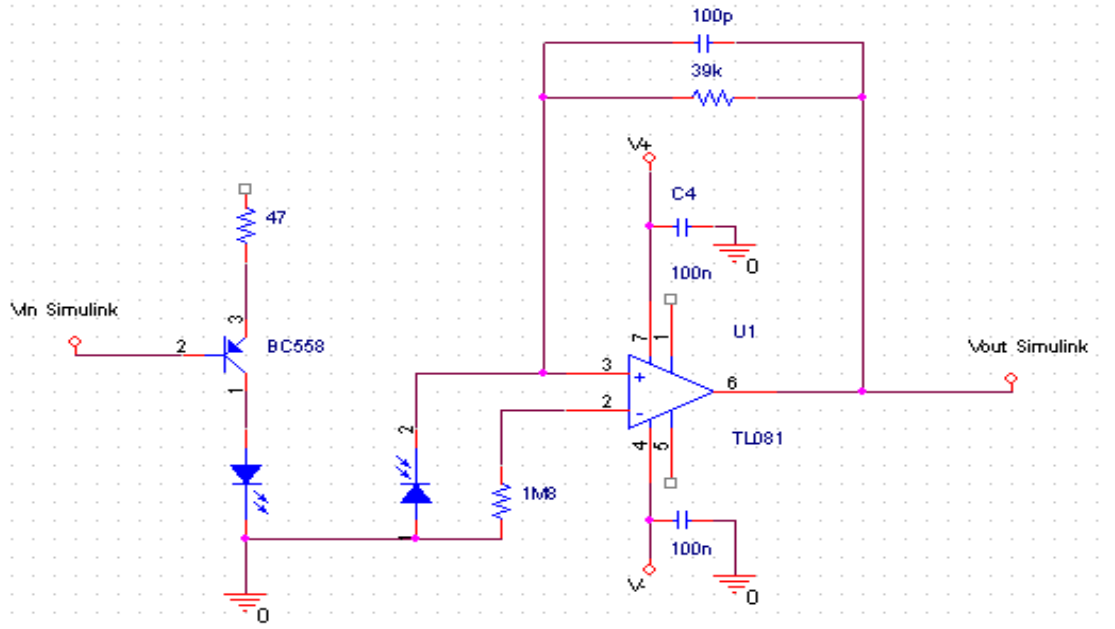


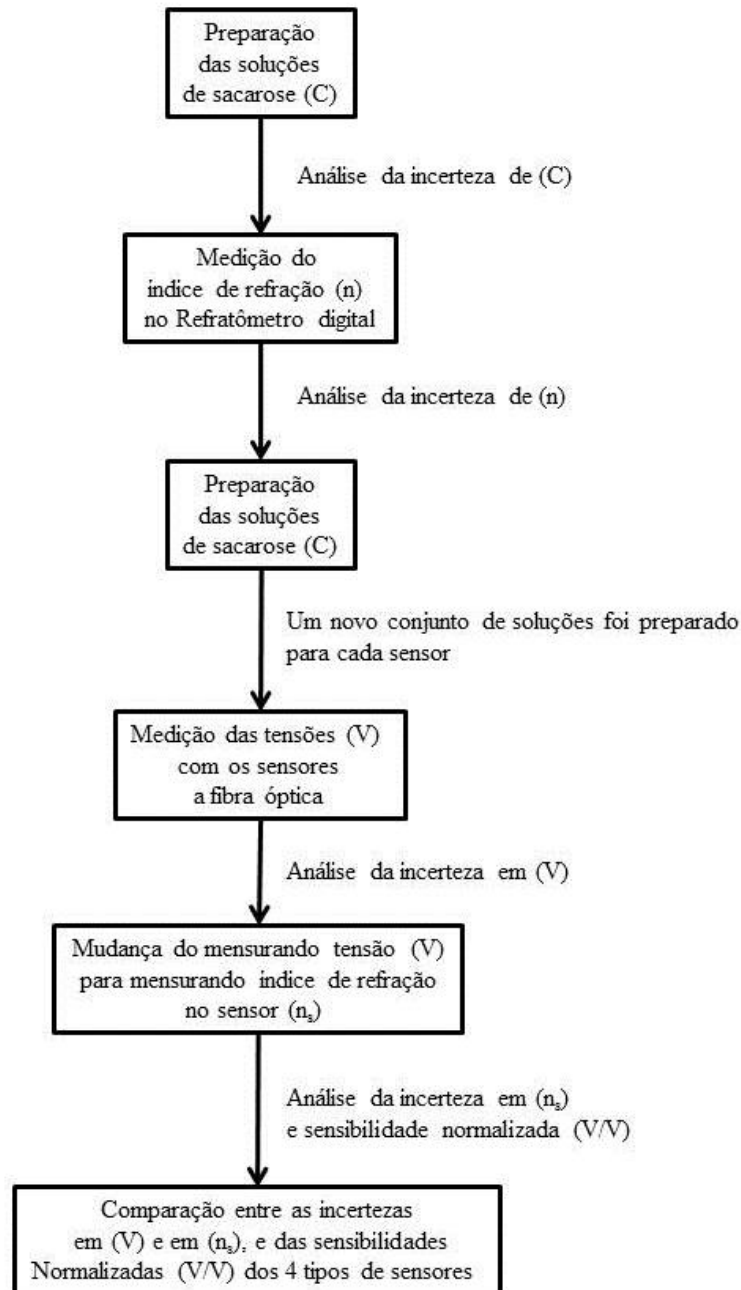
Figura 4.7: Amplificador do sinal da saída do fotodiodo

O sinal amplificado deve estar dentro da faixa de  $-10\text{V}$  à  $10\text{V}$ , que é o limite de tensão para a entrada analógica da placa de aquisição de sinais que envia o sinal de volta para o Simulink<sup>®</sup>.

A amplitude do sinal fornecida pela saída do Amplificador *Lock-in* é salva numa variável denominada “pontos” que importa os dados para o *workspace* do Matlab<sup>®</sup>. São armazenados os cinquenta mil últimos pontos, recolhidos em um segundo, após um breve tempo de acomodação do Amplificador *Lock-in*.

### 4.3 Avaliação e expressão da incerteza de medição pelo ISO GUM 2008

O processo de medição do índice de refração pelo sensor é precedido por algumas etapas. A Figura 4.8 mostra um fluxograma dos experimentos realizados, para facilitar a visualização geral de todo o processo de medição.



**Figura 4.8:** Fluxograma dos experimentos realizados desde a preparação das soluções de sacarose para amostras até a comparação entre os 4 tipos de sensores

Com base nos dados experimentais foi realizada uma modelagem matemática e avaliação dos dados de acordo com o ISO GUM 2008 (Guia para expressão de incerteza de medição) [33], analisando-se também os resíduos e os coeficientes de determinação das curvas de ajuste para determinação das incertezas e sensibilidades. Ao final foi realizada uma análise comparativa entre as respostas dos sensores e o valor estimado do índice de refração da solução de sacarose por eles medido.

O procedimento para avaliação e expressão da incerteza de medição usando a metodologia do ISO GUM 2008, pode ser resumido através dos seguintes passos: 1)

definição do mensurando; 2) diagrama causa-efeito; 3) avaliação da incerteza - padrão; 4) cálculo dos coeficientes de sensibilidade; 5) componentes de incerteza; 6) cálculo da incerteza-padrão combinada. A seguir descreve-se a forma dos cálculos para cada passo. Estes passos já foram utilizados e exemplificados para melhor clareza [34]. A avaliação e interpretação dos valores gerados passo a passo possibilita a identificação das fontes que causam maior impacto no processo.

#### 4.3.1 Definição do mensurando

O mensurando é a grandeza específica submetida à medição [34]. Esta grandeza pode ser função de outras, denominadas grandezas de influência. A Equação (4.1) apresenta um exemplo geral, e as Equações de (4.2) até (4.5) apresentam os mensurandos utilizados neste trabalho.

Os sensores desenvolvidos neste trabalho para medir índice de refração não realizam estas medidas de maneira direta, sendo assim necessária a definição de mensurandos intermediários. Para uma análise detalhada da incerteza, fez-se necessário conhecer todos os passos do processo de medição.

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (4.1)$$

$$C = \frac{m}{v} \quad (4.2)$$

$$n = a_2 C^2 + a_1 C + a_0 \quad (4.3)$$

$$V = b_2 n^2 + b_1 n + b_0 \quad (4.4)$$

$$n_s = \left[ -b_1 - \sqrt{b_1^2 - 4b_2(V - b_0)} \right] / 2b_2 \quad (4.5)$$

Assim, estabelece-se como primeiro mensurando a concentração de sacarose (C) pela conhecida Equação (4.2), relacionando a massa de sacarose (m) e o volume (v) de água na solução.

O segundo mensurando é o índice de refração medido pelo refratômetro (n). Como não se conhece uma expressão que relacione o índice de refração com a concentração de sacarose, a partir do experimento realizado, estabelece-se um

polinômio do segundo grau como a função que define este mensurando. Assim, o mensurando índice de refração torna-se função da concentração e dos coeficientes ( $a_1$ ,  $a_2$  e  $a_3$ ) calculados para a função do segundo grau, Equação (4.3), que melhor ajustou os pontos experimentais.

O terceiro mensurando é a tensão medida pelo sensor a fibra óptica (V). Igualmente, por não ser conhecida uma expressão que relacione tensão e índice de refração, novamente um polinômio do segundo grau é utilizado para definir este mensurando. Novos coeficientes calculados ( $b_1$ ,  $b_2$  e  $b_3$ ) e os valores de referência de índice de refração do refratômetro são utilizados para definir este mensurando. Um polinômio do primeiro grau primeiramente apresentou um ajuste aceitável. Entretanto como um dos objetivos deste trabalho é encontrar a menor incerteza possível na medida, o polinômio do segundo grau proporcionou um melhor ajuste, Equação (4.4).

Finalmente o quarto e último mensurando é o índice de refração medido pelo sensor ( $n_s$ ). Neste caso, como não é realizado um novo experimento, o mensurando é definido a partir dos mesmos coeficientes anteriores que relacionaram a tensão em função do índice de refração, invertendo-se a expressão do polinômio do segundo grau. Esta inversão é feita através da conhecida “*fórmula de Bhaskara*” [35], utilizada na solução de equações do segundo grau. No presente caso utiliza-se as soluções encontradas pela diferença de acordo com a Equação (4.5), onde os valores das tensões (V) na Equação (4.4) foram transportados para o lado direito da equação.

Os coeficientes ( $a_i$  e  $b_i$ ) que definem os mensurandos podem ser encontrados (após definido o grau do polinômio de ajuste, com  $p$  coeficientes), considerando-se os vetores e suas respectivas dimensões abaixo [36]:

$$\mathbf{a} = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_m \end{bmatrix} \text{ dimensão } (p \times 1)$$

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \text{ dimensão } (n \times 1)$$

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \text{ dimensão } (n \times p)$$



onde

$\mathbf{a}$  = vetor dos coeficientes a serem estimados

$\mathbf{X}$  = matriz das variáveis independentes

$\mathbf{y}$  = vetor dos valores observados

Assim, pela solução da Equação (4.6) descrita na forma matricial, tem-se os resultados dos coeficientes.

$$\mathbf{a} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y} \quad (4.6)$$

No caso em estudo o ajuste foi feito com um polinômio do segundo grau, onde  $p = 3$ .

#### 4.3.2 Diagrama causa – efeito

Um diagrama causa-efeito é uma ferramenta importante na visualização das grandezas que influenciam a medição e na maneira como estas tem seus valores determinados. As Figuras a seguir apresentam os diagramas para os respectivos mensurandos definidos.

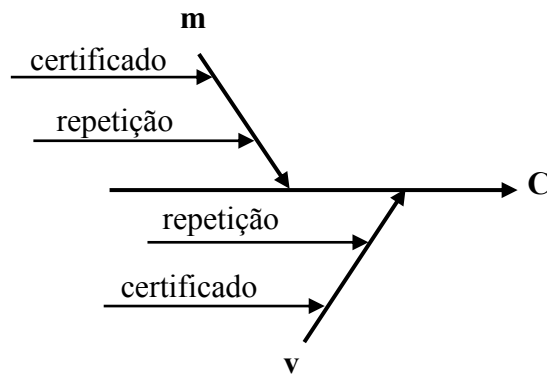


Figura 4.9: Diagrama causa-efeito da medição das concentrações

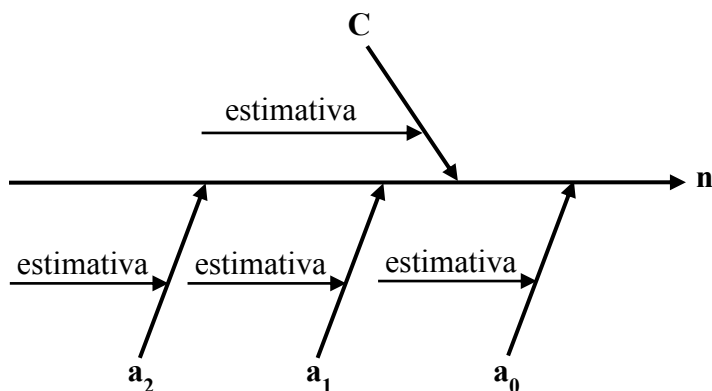


Figura 4.10: Diagrama causa-efeito da medição do índice de refração pelo refratômetro 34

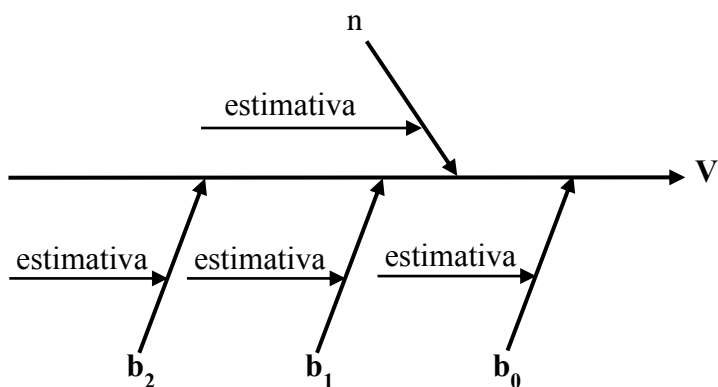


Figura 4.11: Diagrama causa-efeito da medida de tensão

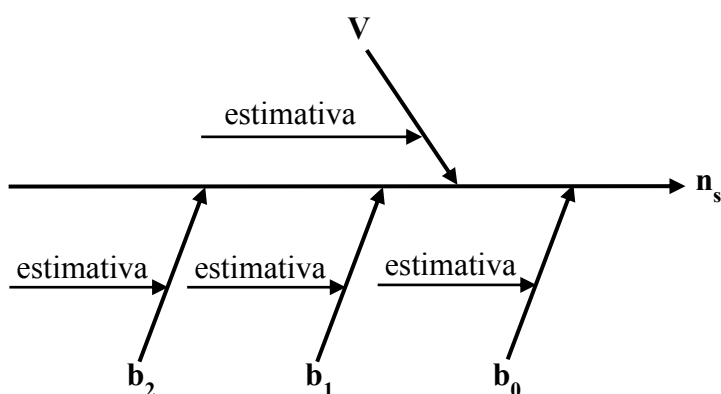


Figura 4.12: Diagrama causa-efeito da medida do índice de refração pelo sensor

### 4.3.3 Avaliação das incertezas – padrão

A incerteza padrão de cada grandeza de influência, denominadas fontes de entrada,  $u(x_i)$ , é estimada de acordo com o modo em que a fonte de entrada aparece na definição do mensurando [34]. Esta estimativa do valor esperado de uma grandeza pode ser estipulado de várias maneiras, considerando-se as informações conhecidas sobre a variável.

#### a) Avaliação da incerteza – padrão da concentração de sacarose

No caso da concentração de sacarose, considera-se uma avaliação do tipo B [33], onde as especificações da resolução,  $s(x_i)$ , fornecidas pelo fabricante nos equipamentos de medida e uma distribuição retangular dos valores de  $x_i$  são considerados, Equação (4.7). As Equações (4.8) e (4.9) mostram as expressões para avaliação da incerteza-

padrão relacionada à massa de sacarose e ao volume, respectivamente. São considerados a resolução da balança ( $a_m$ ) e da proveta ( $a_v$ ).

$$u(\bar{x}_i) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{3}} \quad (4.7)$$

$$u(m) = \frac{a_m}{\sqrt{3}} \quad (4.8)$$

$$u(v) = \frac{a_v}{\sqrt{3}} \quad (4.9)$$

## **b) Avaliação da incerteza – padrão dos coeficientes do polinômio de ajuste**

A incerteza dos coeficientes do polinômio de ajuste está associada à validação do modelo escolhido. Assim, três maneiras eficientes de avaliação são a análise do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), a análise residual e a variância.

### **b.1) Coeficiente de determinação ( $R^2$ )**

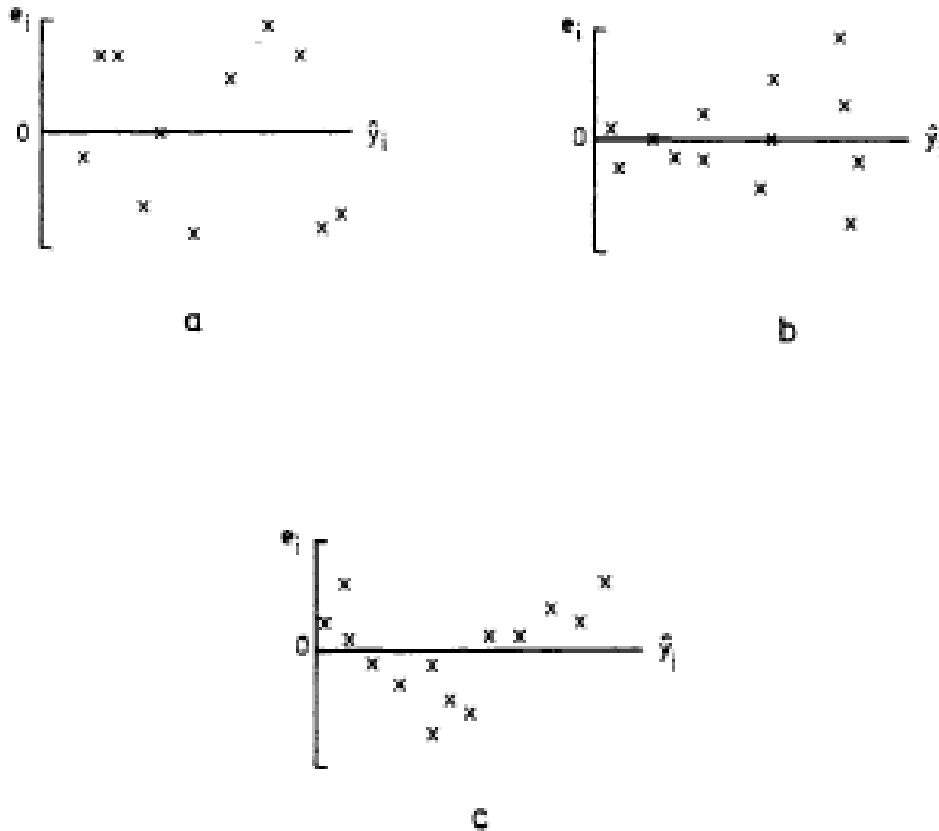
O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) indica a porcentagem da variação da variável dependente explicada pelas variáveis independentes através do polinômio utilizado, ou seja, expressa a proporção da variação dos resultados experimentalmente fornecidos do mensurando em relação às grandezas de influência [36]. Um  $R^2 = 0,7834$  indica que as variáveis independentes explicam 78,34 % da variável dependente. Assim, observa-se que um  $R^2 = 1$  determina um ajuste polinomial perfeito.

### **b.2) Análise dos resíduos**

Os resíduos são calculados pela diferença entre os valores medidos e o valor de referência ( $e_i = y_i - \hat{y}_i$ ), ou seja, o erro da medida. Um gráfico de resíduos fornece informações sobre a distribuição dos valores ajustados pelo modelo.

A investigação da homocedasticidade, isto é, se os dados regredidos encontram-se mais homogeneamente e menos dispersos em torno da curva de regressão, ajuda a validar o modelo e identificar prováveis problemas. A Figura 4.13 apresenta três exemplos que auxiliam a análise dos resíduos.

A Figura 4.13 (a) indica que não há anormalidade, pois os resíduos estão distribuídos aleatoriamente dentro de uma faixa horizontal, com o número de resíduos positivos aproximadamente igual ao número de resíduos negativos. Tem-se também uma sequência aleatória de resíduos positivos e negativos, atendendo a condição de homocedasticidade. A Figura 4.13 (b) indica que a condição de homocedasticidade não foi cumprida, pois a dispersão dos resíduos aumenta com o eixo  $y$ . Isto indica que a precisão das medições neste intervalo não é constante. Os resíduos em forma de U exemplificados na Figura 4.13 (c) são o resultado do ajuste feito por uma linha reta aos dados que seriam melhor representados por uma curva.



**Figura 4.13: Exemplos de gráficos de resíduos. (a) Resíduos sem anormalidades. (b) Dispersão dos resíduos aumenta com o eixo  $y$ . (c) resíduos de ajuste feito por uma reta quando seriam melhor resolvidos por uma curva. Figura adaptada [36].**

### b.3) Análise da variância

As variações dos diferentes parâmetros necessários para determinar os intervalos de confiança dos coeficientes, são obtidas a partir da matriz de variância-covariância dos coeficientes da regressão [36], descrita a seguir:

$$\mathbf{V}(\mathbf{b}) = \begin{bmatrix} (s_{b_0})^2 & cov(b_0, b_1) & \dots & cov(b_0, b_m) \\ cov(b_1, b_0) & (s_{b_1})^2 & \dots & cov(b_1, b_m) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ cov(b_m, b_0) & \dots & \dots & (s_{b_m})^2 \end{bmatrix}$$

Os parâmetros  $(s_{b_i})^2$  representam as estimativas do erro experimental ( $\sigma^2$ ) obtidas a partir do quadrado da média residual. A diagonal principal da matriz  $\mathbf{V}(\mathbf{b})$  expressa o valor para cada parâmetro. A Equação (4.10) demonstra a maneira como  $\mathbf{V}(\mathbf{b})$  é encontrada na forma matricial:

$$\mathbf{V}(\mathbf{b}) = \sigma^2 (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \quad (4.10)$$

Se o modelo é adequado, um intervalo de confiança de 95 % do valor médio verdadeiro das variáveis controladas pode ser obtido através da Equação (4.11). Este valor é a incerteza dos coeficientes ( $u_{b_i}$ ).

$$u_{b_i} = \sqrt{V(b)} \quad (4.11)$$

#### 4.3.4 Cálculo dos coeficientes de sensibilidade

Os coeficientes de sensibilidade ( $c_i$ ) estimam a variação do mensurando em relação as variações de cada fonte de entrada. O cálculo deste coeficiente é realizado de acordo com a Equação (4.12). A seguir, tem-se as Equações dos coeficientes de sensibilidade para os mensurandos da concentração de sacarose, índice de refração, tensão e índice de refração pelo sensor, todos anteriormente determinados.

$$c_i = \frac{\partial y}{\partial x_i} \quad (4.12)$$

$$c_m = \frac{\partial C}{\partial m} = \frac{1}{V} \quad (4.13)$$

$$c_V = \frac{\partial C}{\partial V} = \frac{m}{V^2} \quad (4.14)$$

$$c_{a_0} = \frac{\partial IR}{\partial a_0} = 1 \quad (4.15)$$

$$c_{a_1} = \frac{\partial IR}{\partial a_1} = C \quad (4.16)$$

$$c_{a_2} = \frac{\partial IR}{\partial a_2} = C^2 \quad (4.17)$$

$$c_C = \frac{\partial IR}{\partial C} = 2a_2C + a_1 \quad (4.18)$$

$$c_{b_0} = \frac{\partial V}{\partial b_0} = 1 \quad (4.19)$$

$$c_{b_1} = \frac{\partial V}{\partial b_1} = IR \quad (4.20)$$

$$c_{b_2} = \frac{\partial V}{\partial b_2} = IR^2 \quad (4.21)$$

$$c_{IR} = \frac{\partial V}{\partial IR} = 2b_2IR + b_1 \quad (4.22)$$

$$c_{b_{0S}} = \frac{\partial IR_S}{\partial b_0} = \frac{1}{\sqrt{b_1^2 - 4b_2(b_0 - V)}} \quad (4.23)$$

$$c_{b_{1S}} = \frac{\partial IR_S}{\partial b_1} = \frac{-1 - \frac{b_1}{\sqrt{b_1^2 - 4b_2(b_0 - V)}}}{2b_2} \quad (4.24)$$

$$c_{b_{2S}} = \frac{\partial IR_S}{\partial b_2} = \frac{-b_1 - \sqrt{b_1^2 - 4b_2(b_0 - V)}}{2b_2^2} + \frac{b_0 - V}{b_2\sqrt{b_1^2 - 4b_2(b_0 - V)}} \quad (4.25)$$

$$c_V = \frac{\partial IR_S}{\partial V} = -\frac{1}{\sqrt{b_1^2 - 4b_2(b_0 - V)}} \quad (4.26)$$

### 4.3.5 Componentes de incerteza

Os componentes de incerteza de cada fonte podem ser calculados através do produto da incerteza-padrão da fonte com seus respectivos coeficiente de sensibilidade, de acordo com a Equação (4.27)

$$u_{x_i}(y) = \frac{\partial y}{\partial x_i} u(x_i) = c_{x_i} u(x_i) \quad (4.27)$$

onde:

$u_{x_i}(y)$  = componente de incerteza na unidade do mensurado referente à fonte  $x_i$ ;

$c_{x_i}$  = coeficiente de sensibilidade referente à fonte  $x_i$ ;

$u(x_i)$  = incerteza referente à fonte  $x_i$ .

Desta maneira pode-se avaliar o impacto da incerteza de cada grandeza de entrada na incerteza combinada do mensurado, sendo esta uma ferramenta de peso para a sua avaliação. Através desta análise pode-se considerar as ações a serem tomadas para minimizar a incerteza do mensurado de maneira mais efetiva.

### 4.3.6 Cálculo da incerteza-padrão combinada

A incerteza do mensurado é o resultado da combinação das incertezas de todas as grandezas de entrada. Esta incerteza é calculada considerando-se na relação entre as grandezas de entradas se elas são independentes (não correlacionadas) ou dependentes (correlacionadas) umas com as outras.

A incerteza-padrão combinada  $u_c(y)$  é um desvio-padrão estimado, caracterizando a dispersão dos valores que poderiam, razoavelmente, ser atribuídos ao mensurado  $Y$  [33].

### a) Incerteza combinada de fontes de entrada não correlacionadas

A Equação (4.28) define a incerteza combinada quando todas as fontes de entrada são independentes entre si. Assim, tem-se uma combinação apropriada de todas as incertezas-padrão das grandezas de entrada.

Neste trabalho, a incerteza das concentrações consideram as incertezas das medidas da massa de sacarose e do volume de água, que não são correlacionadas, sendo então definida pela Equação (4.29)

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left[ \frac{\partial f}{\partial x_i} u(x_i) \right]^2} \quad (4.28)$$

$$u_c(C) = \sqrt{u_{c_m}^2 + u_{c_v}^2} \quad (4.29)$$

### b) Incerteza combinada de fontes de entrada correlacionadas

No caso das fontes de entrada serem correlacionadas, a incerteza combinada é definida segundo a Equação

(4.30).

$$\begin{aligned} u_c^2(y) &= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \\ &= \sum_{i=1}^N \left[ \frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(u_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \end{aligned} \quad (4.30)$$

Esta Equação pode também ser escrita da forma (4.31), sendo esta a forma implementada nos cálculos deste trabalho,



$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(u_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i) u(x_j) r(x_i x_j) \quad (4.31)$$

onde

$$r(x_i x_j) = \frac{u(x_i x_j)}{u(x_i) u(x_j)} \quad (4.32)$$

A seguir, tem-se as Equações para os cálculos das incerteza combinada para o caso dos mensurandos índice de refração (4.33), tensão (4.34) e índice de refração medido pelo sensor (4.35).

$$u_c(n) = \sqrt{\frac{u_c^2(n) + u_{a_0}^2(n) + u_{a_1}^2(n) + u_{a_2}^2(n) + \dots}{2[u_{a_0}(n)u_{a_1}(n)r(a_0 a_1) + u_{a_0}(n)u_{a_2}(n)r(a_0 a_2) + \dots + u_{a_1}(n)u_{a_2}(n)r(a_1 a_2)]}} \quad (4.33)$$

$$u_c(V) = \sqrt{\frac{u_{IR}^2(V) + u_{b_0}^2(V) + u_{b_1}^2(V) + u_{b_2}^2(V) + \dots}{2[u_{b_0}(V)u_{b_1}(V)r(b_0 b_1) + u_{b_0}(V)u_{b_2}(V)r(b_0 b_2) + \dots + u_{b_1}(V)u_{b_2}(V)r(b_1 b_2)]}} \quad (4.34)$$

$$u_c(n_s) = \sqrt{\frac{u_V^2(n_s) + u_{b_0}^2(n_s) + u_{b_1}^2(n_s) + u_{b_2}^2(n_s) + \dots}{2[u_{b_0}(n_s)u_{b_1}(n_s)r(b_0 b_1) + u_{b_0}(n_s)u_{b_2}(n_s)r(b_0 b_2) + \dots + u_{b_1}(n_s)u_{b_2}(n_s)r(b_1 b_2)]}} \quad (4.35)$$

# Capítulo 5

## Resultados e discussões

### 5.1 Experimento para validação das concentrações de sacarose como referência de índice de refração

Antes mesmo do desenvolvimento do elemento sensor, foram necessários alguns passos para o processo de medições. Uma fase importante foi a preparação das soluções utilizadas para medidas dos índices de refração. Conforme dito anteriormente a variação da concentração da sacarose produz valores de índice de refração dentro da região de interesse. Assim, foi realizado um experimento para obtenção da curva de calibração da sacarose. Foram ajustados valores de concentração de sacarose para 15 %, 25 %, 30 %, 45 % e 52 % de sacarose em água. Conforme experimentos já realizados, os índices de refração obtidos nestas concentrações estão entre 1,33 e 1,39.

O experimento a seguir foi realizado para o levantamento de uma curva de validação e uma estimativa da incerteza do seu valor mais preciso. Assim, faz-se necessário avaliar primeiramente a incerteza das concentrações de sacarose, antes mesmo do levantamento das medidas no refratômetro.

#### 5.1.1 Incerteza padrão das concentrações

As concentrações de sacarose Merck<sup>®</sup> foram definidas como mensurando de acordo com a Equação (4.2). As medidas de sacarose para cada concentração foram realizadas com uma balança de precisão, modelo BG 400 da Gehaka. A todas as porções de sacarose foram adicionados 10 mL de água, medidos numa proveta de 10 mL, e misturadas num agitador, modelo TS-2000 A da Biomixer, formando assim cada amostra. A Tabela 5.1 mostra os valores de referência das concentrações, com sua respectiva unidade de medida.

**Tabela 5.1: Valores de referência das concentrações de sacarose.**

<b>Concentração (C)</b> <b>(%)</b>	<b>Valor de Referência (C)</b> <b>(g/mL)</b>
15	$1,5 \times 10^{-1}$
25	$2,5 \times 10^{-1}$
30	$3,0 \times 10^{-1}$
45	$4,5 \times 10^{-1}$
52	$5,2 \times 10^{-1}$

As incertezas das medidas das concentrações estão relacionadas aos instrumentos utilizados nas medida das massas de sacarose e dos volumes de água. Assim, calculadas de acordo com as Equações (4.8) e (4.9), tem-se as incertezas-padrão na avaliação das concentrações:

$$u(m) = 5,77 \times 10^{-4} g$$

$$u(v) = 5,77 \times 10^{-2} mL$$

### **5.1.2 Coeficientes de sensibilidade das concentrações**

Como a Equação (4.13) dos coeficientes de sensibilidade das massas está relacionada apenas ao volume utilizado, e este é constante em todas as concentrações, tem-se:

$$c_m = 0,1 mL^{-1}$$

Já os coeficientes de sensibilidade do volume para cada concentração, Equação (4.14), dependem também das massas de sacarose, sendo seus resultados assim expostos na tabela na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Coeficientes de sensibilidade das concentrações de sacarose.

Concentração (%)	15	25	30	45	52
$c_v(\text{g/mL}^2)$	0,015	0,025	0,03	0,045	0,052

### 5.1.3 Componentes da incerteza das concentrações

Os componentes da incerteza para cada concentração são calculados de acordo com a Equação (2.29). A Tabela 5.3 apresenta os resultados para cada concentração.

Tabela 5.3: Componentes das incertezas das concentrações de sacarose.

Concentração (%)	15	25	30	45	52
$u_m(\text{C})(\text{g/mL})$	$5,77 \times 10^{-5}$	$5,77 \times 10^{-5}$	$5,77 \times 10^{-5}$	$5,77 \times 10^{-5}$	$5,77 \times 10^{-5}$
$u_v(\text{C})(\text{g/mL})$	$8,66 \times 10^{-4}$	$1,44 \times 10^{-3}$	$1,73 \times 10^{-3}$	$2,60 \times 10^{-3}$	$3,00 \times 10^{-3}$

### 5.1.4 Incerteza padrão combinada das concentrações

A incerteza-padrão combinada para cada concentração é calculada de acordo com a Equação (4.29). Observa-se na Tabela 5.4 que o resultado da incerteza-padrão combinada das concentrações é idêntico a incerteza relacionada a medida do volume de água na concentração, mostrando assim a influência da medida do volume na elaboração das concentrações de sacarose.

Tabela 5.4: Incerteza-padrão combinada das concentrações de sacarose.

Concentração (%)	15	25	30	45	52
$u_c(\text{C})(\text{g/mL})$	$8,66 \times 10^{-4}$	$1,44 \times 10^{-3}$	$1,73 \times 10^{-3}$	$2,60 \times 10^{-3}$	$3,00 \times 10^{-3}$

A Tabela 5.5 a seguir contém as concentrações com suas respectivas incertezas, facilitando a visualização. Observa-se que a incerteza da concentração aumenta para valores mais concentrados.

Tabela 5.5: Valores das concentrações de sacarose com incertezas.

Concentração (C) (%)	Valor de Referência com incerteza (C) (g/mL)
15	0,1500 ± 0,0009
25	0,250 ± 0,001
30	0,300 ± 0,002
45	0,450 ± 0,003
52	0,520 ± 0,003

### 5.1.5 Estimativa da incerteza de medição do índice de refração

Foram feitas cinco amostras de cada concentração para a realização do experimento. Estas amostras foram medidas no refratômetro digital, modelo Q76780 da Quimis, sendo os valores medidos indicados na Tabela 5.6. A distribuição dos valores de índice de refração medidos foram ajustados por um polinômio do segundo grau conforme explicado no Capítulo 4. Os resultados dos coeficientes do polinômio de ajuste, denominados do menor para o maior grau como  $a_0$ ,  $a_1$  e  $a_2$ , foram calculados de acordo com a Equação (4.3):

$$a_0 = 1,3337$$

$$a_1 = 1,546 \times 10^{-1} \text{ (mL/g)}$$

$$a_2 = 7,53 \times 10^{-2} \text{ (mL}^2\text{/g}^2\text{)}$$

Tabela 5.6: Resultados dos índices de refração medidos no refratômetro

Ensaio #	Concentração (%)				
	15	25	30	45	52
Índice de Refração					
<b>Ensaio 1</b>	1,3556	1,3680	1,3730	1,3887	1,3932
<b>Ensaio 2</b>	1,3548	1,3680	1,3721	1,3897	1,3925
<b>Ensaio 3</b>	1,3551	1,3671	1,3739	1,3878	1,3937
<b>Ensaio 4</b>	1,3547	1,3677	1,3730	1,3871	1,3953
<b>Ensaio 5</b>	1,3553	1,3686	1,3734	1,3866	1,3940

A Figura 5.1 mostra a distribuição dos valores medidos com o ajuste polinomial.

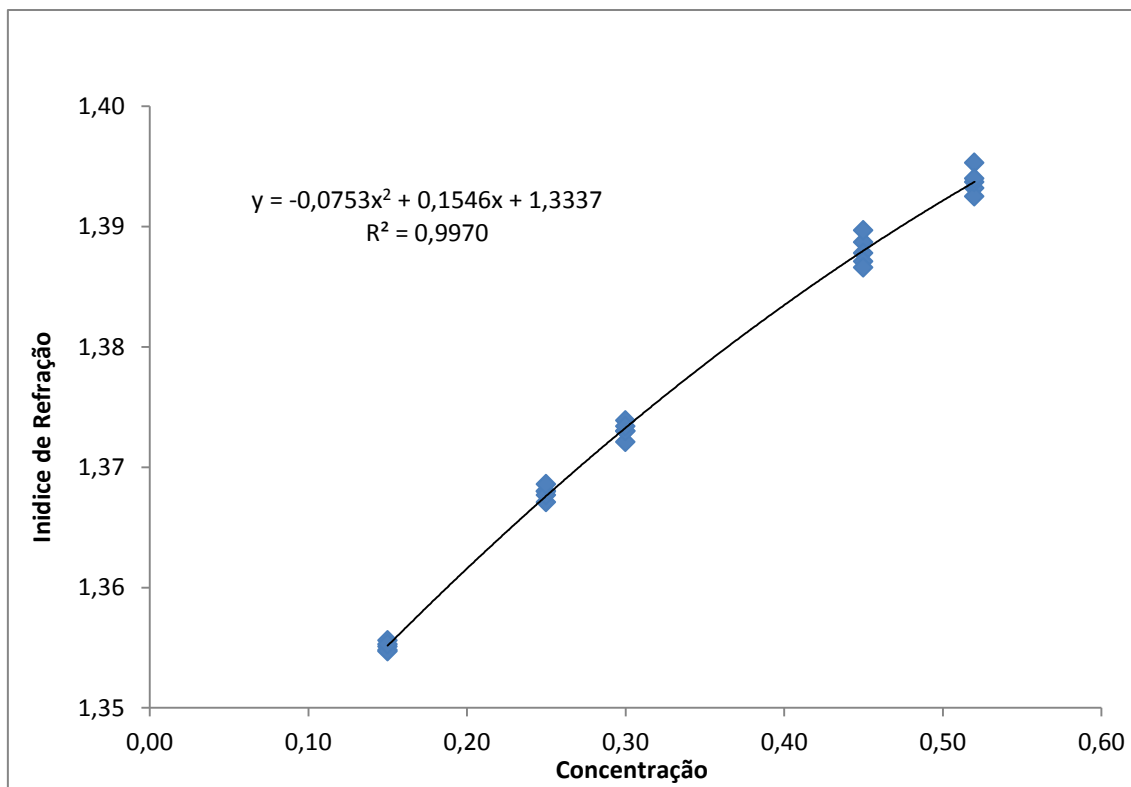


Figura 5.1: Índice de refração calculado pelo refratômetro em função das amostras de sacarose.

Utilizando-se o polinômio de ajuste para os respectivos valores de concentração, tem-se então na Tabela 5.7 os valores de referência para os índices de refração que serão utilizados nos experimentos posteriores. Observa-se que o valor da concentração a 0%, ou seja, água pura, é determinado pelo próprio coeficiente  $a_0$  do polinômio.

Tabela 5.7: Valores de referência para os índices de refração.

Concentração (%)	Valor de Referência do $n$
<b>0</b>	1,3337
<b>15</b>	1,3552
<b>25</b>	1,3676
<b>30</b>	1,3733
<b>45</b>	1,3880
<b>52</b>	1,3937

Obedece-se o limite máximo de quatro casas decimais na expressão dos valores por ser este o limite encontrado na menor incerteza das concentrações e estar de acordo

com a resolução do refratômetro utilizado. A avaliação das incertezas da medida é que determinarão a confiabilidade destes valores.

### 5.1.6 Incertezas–padrão dos coeficientes do polinômio

Desenvolvendo-se o processo de validação do modelo empregado, observa-se que o valor do coeficiente de determinação é  $R^2 = 0,9970$ . Este valor pode ser considerado aceitável pela quantidade de medidas realizadas no experimento. O gráfico de resíduos, Figura 5.2, indica que, a pesar de se ter uma distribuição aproximadamente igual a do número de resíduos positivos e negativos, a dispersão dos resíduos aumenta com o índice de refração, o que indica uma não homocedasticidade no modelo.

Observa-se então que o processo de mistura da solução de sacarose não apresenta a mesma homogeneidade com o aumento da massa de sacarose adicionada na formação da solução.

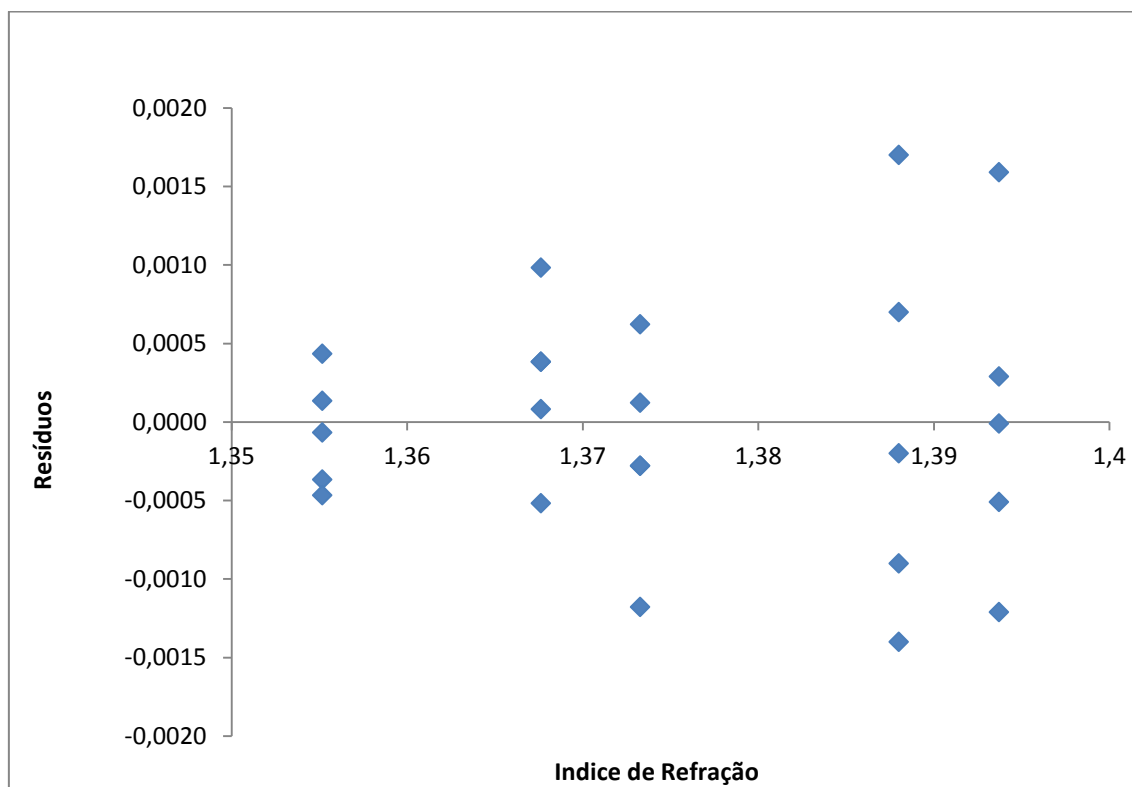


Figura 5.2: Resíduos dos índices de refração medidos pelo refratômetro

A incerteza-padrão dos coeficientes é determinada pela raiz quadrada da matriz de covariância, Equação (4.11), lembrando que para os coeficientes são utilizados os

valores da diagonal principal. A Tabela 5.8 indica os valores encontrados com suas respectivas unidades.

**Tabela 5.8: Incerteza-parão dos coeficientes da curva do índice de refração**

<b>ua<sub>0</sub></b>	<b>ua<sub>1</sub> (mL/g)</b>	<b>ua<sub>2</sub> (mL<sup>2</sup>/g<sup>2</sup>)</b>
1,241 x 10 <sup>-3</sup>	8,182 x 10 <sup>-3</sup>	1,189x10 <sup>-2</sup>

As incertezas-padrão das concentrações já foram calculadas (Tabela 5.5). No caso da água pura (C = 0), a incerteza da concentração também é zero.

### 5.1.7 Coeficientes de sensibilidade dos índices de refração

A Tabela 5.9 indica os coeficientes de sensibilidade calculados a partir das Equações (4.15), (4.16), (4.17) e (4.18). Os coeficientes de sensibilidade referentes aos coeficientes do primeiro grau do polinômio são maiores do que os do segundo grau, porém não são desprezíveis para a precisão desejada. Deve-se lembrar de que estes coeficientes do polinômio são correlacionados.

**Tabela 5.9: Coeficientes de sensibilidade dos índices de refração**

<b>Concentração (C) (%)</b>	<b>ca<sub>0</sub></b>	<b>ca<sub>1</sub> (g/mL)</b>	<b>ca<sub>2</sub> (g<sup>2</sup>/mL<sup>2</sup>)</b>	<b>c<sub>C</sub> (mL/g)</b>
<b>0</b>	1	0	0	1,546x10 <sup>-1</sup>
<b>15</b>	1	1,5x10 <sup>-1</sup>	2,25x10 <sup>-2</sup>	1,320 x10 <sup>-1</sup>
<b>25</b>	1	2,5x10 <sup>-1</sup>	6,25x10 <sup>-2</sup>	1,170x10 <sup>-1</sup>
<b>30</b>	1	3,0x10 <sup>-1</sup>	9,0x10 <sup>-2</sup>	1,094x10 <sup>-1</sup>
<b>45</b>	1	4,5x10 <sup>-1</sup>	2,025x10 <sup>-1</sup>	8,685x10 <sup>-2</sup>
<b>52</b>	1	5,2x10 <sup>-1</sup>	2,704x10 <sup>-1</sup>	7,630x10 <sup>-2</sup>

### 5.1.8 Incerteza-padrão combinada dos índices de refração

A composição geral da incerteza dos índices de refração é calculada a partir da Equação (4.33). Neste caso os coeficientes são correlacionados e as concentrações não. A Tabela 5.10 indica as incertezas-padrão combinadas calculadas.



**Tabela 5.10: Incerteza-padrão combinada dos índices de refração**

<b>n</b>	<b>1,334</b>	<b>1,3552</b>	<b>1,3676</b>	<b>1,3733</b>	<b>1,3880</b>	<b>1,3937</b>
<b><math>u_c(n)</math></b>	$1,24 \times 10^{-3}$	$3,68 \times 10^{-4}$	$2,82 \times 10^{-4}$	$3,20 \times 10^{-4}$	$3,20 \times 10^{-4}$	$3,98 \times 10^{-4}$

A seguir, na Tabela 5.11 temos o resultado geral do experimento, com os valores das soluções de sacarose e dos índices de refração medidos pelo refratômetro com as respectivas incertezas. Os referidos valores de índice de refração serão utilizados como referência para o experimento com os sensores a fibra óptica.

**Tabela 5.11: Resultado geral do experimento para validação das soluções de sacarose como referência de índice de refração.**

<b>Concentração (g/mL)</b>	<b>n</b>
água pura	$1,334 \pm 0,001$
$0,1500 \pm 0,0009$	$1,3552 \pm 0,0004$
$0,250 \pm 0,001$	$1,3676 \pm 0,0003$
$0,300 \pm 0,002$	$1,3733 \pm 0,0003$
$0,450 \pm 0,003$	$1,3880 \pm 0,0003$
$0,520 \pm 0,003$	$1,3937 \pm 0,0004$

A incerteza da água pura (0 %) é maior porque já foi calculada pela curva de ajuste. Ela representa a própria incerteza associada ao coeficiente  $a_0$ . A precisão do refratômetro permite que as medidas de índice de refração sejam mais precisas do que as medidas das concentrações.

## **5.2 Medições do índice de refração com sensores a fibra óptica**

Para a realização do experimento com cada um dos quatro tipos de sensores (fibra de 1 mm com casca, fibra de 1 mm sem casca, fibra de 1 mm com *taper* e fibra de 0,45 mm sem casca) foram produzidas as soluções de sacarose como concentrações de referência, de acordo com os procedimentos descritos na seção 5.1.1. Foi utilizada também uma amostra de água pura.

Os sensores não foram colados no suporte, sendo cuidadosamente manipulados com o uso de luvas durante o experimento. Durante as medidas os sensores não foram tocados para evitar que seu posicionamento no suporte fosse alterado, variando o valor da tensão de saída. Para a realização das medidas as amostras foram colocadas sobre uma base ajustável que é elevada ao giro de uma alavanca, levando assim os recipientes com as amostras até o sensor sem tocá-los.

O recipiente é elevado até bem próximo a base do sensor, procurando manter-se a mesma área do sensor submersa em todas as medidas. Todas as amostras foram de 5 mL e os recipientes eram iguais, permitindo que o nível da amostra fosse igual em todas as medidas realizadas. Este procedimento é mais crítico nos sensores com fibras sem casca, pois a tensão nestes sensores varia mais com a altura do líquido. Entretanto, percebeu-se também que após mergulhar a parte da curva do sensor não há uma grande diferença na variação da tensão.

As medidas foram realizadas em sequência, inserindo-se o sensor na água pura e concentrações a 15 %, 25 %, 30 %, 45 % e 52 % sucessivamente, sempre mergulhando o sensor entre uma medida e outra num outro recipiente com água para limpeza.

A temperatura foi monitorada durante os experimentos, entretanto, experimentos anteriores com a fibra plástica demonstram que na temperatura ambiente, aproximadamente entre 20 °C e 25 °C a variação do índice de refração com a temperatura é desprezível.

Durante cada medida, o sensor ficava mergulhado apenas alguns segundos, tempo suficiente para estabilizar a resposta apresentada pelo Simulink<sup>®</sup> em volts.

Os valores das tensões medidas pelo sensor, variam caso o sensor seja reposicionado. O mais importante então, não é o valor absoluto da tensão medida, mais a repetitividade deste valor que está associada a incerteza da medida. O método estatístico utilizado do ISO GUM 2008, a definição do mensurando e os coeficientes encontrados para cada curva apresentam a relação dos valores de tensão com os valores de índice de refração. Assim, cada vez que o sensor é reposicionado necessita de uma nova calibração, produzindo novos valores de tensão e, conseqüentemente, novos coeficientes e novas curvas que possuem a mesma repetitividade.

As sequências com dez medidas consecutivas realizadas para cada sensor, foram todas realizadas sem que os sensores fossem reposicionados. Os experimentos foram repetidos com cinco sensores de cada um dos quatro tipos de fibras. A observação das incertezas nestes sensores de um mesmo tipo revelam a repetitividade do tipo de sensor.

O objetivo principal deste trabalho é medir a variação do índice de refração das soluções de sacaroses com os sensores a fibra óptica. Entretanto, a saída direta do sensor é em volts. Assim, a partir da equação inversa da tensão em função do índice de refração obtém-se o índice de refração em função da tensão e conseqüentemente em função das concentrações de sacarose. Por isso, a análise final deste trabalho considera o índice de refração medido pelo sensor como mensurando, e sua incerteza combinada.

Na comparação entre os sensores serão apresentados os valores das incertezas em volt e em unidade de índice de refração de todos os sensores, e não os valores de referências medidos em volts.

Para evitar o excesso de informações desnecessárias a compreensão dos resultados, foi utilizado como exemplo do processo de medição os resultados obtidos no experimento com o sensor de 1 mm sem casca, Tabela 5.12. Todo o processo de análise estatística apresentado a seguir foi realizado para todos os outros sensores. No Anexo A constam todos os resultados dos demais sensores.

**Tabela 5.12: Tensões medidas pelo sensor 1 de fibra de 1 mm sem casca.**

Ensaio #	Índice de Refração de Referência					
	1,334	1,3552	1,3676	1,3733	1,3880	1,3937
	Tensão de Saída (V)					
<b>Ensaio 1</b>	2,7239	2,1489	1,8581	1,7251	1,3768	1,2552
<b>Ensaio 2</b>	2,7549	2,1632	1,8755	1,7386	1,3783	1,2522
<b>Ensaio 3</b>	2,7412	2,1584	1,8766	1,7239	1,3825	1,2594
<b>Ensaio 4</b>	2,7459	2,1604	1,8670	1,7220	1,3793	1,2744
<b>Ensaio 5</b>	2,7503	2,1575	1,8731	1,7137	1,3892	1,2483
<b>Ensaio 6</b>	2,7499	2,1724	1,8648	1,7174	1,3949	1,2481
<b>Ensaio 7</b>	2,7316	2,1508	1,8570	1,7148	1,3799	1,2405
<b>Ensaio 8</b>	2,7317	2,1453	1,8480	1,7079	1,3675	1,2355
<b>Ensaio 9</b>	2,7218	2,1323	1,8376	1,6938	1,3642	1,2312
<b>Ensaio 10</b>	2,7030	2,1260	1,8468	1,6906	1,3587	1,2354

Os valores de tensão indicados na Tabela 5.12 foram ajustados por um polinômio do segundo grau da Equação (4.4), conforme explicado no Capítulo 4. Os resultados dos coeficientes do polinômio de ajuste, denominados do menor para o maior grau como  $b_0$ ,  $b_1$  e  $b_2$  são:

$$b_0 = 1,2713 \times 10^2 (V)$$

$$b_1 = -1,589 \times 10^2 (V)$$

$$b_2 = 4,919 \times 10^1 (V)$$

A Figura 5.3 demonstra graficamente a distribuição dos valores medidos com o ajuste polinomial.

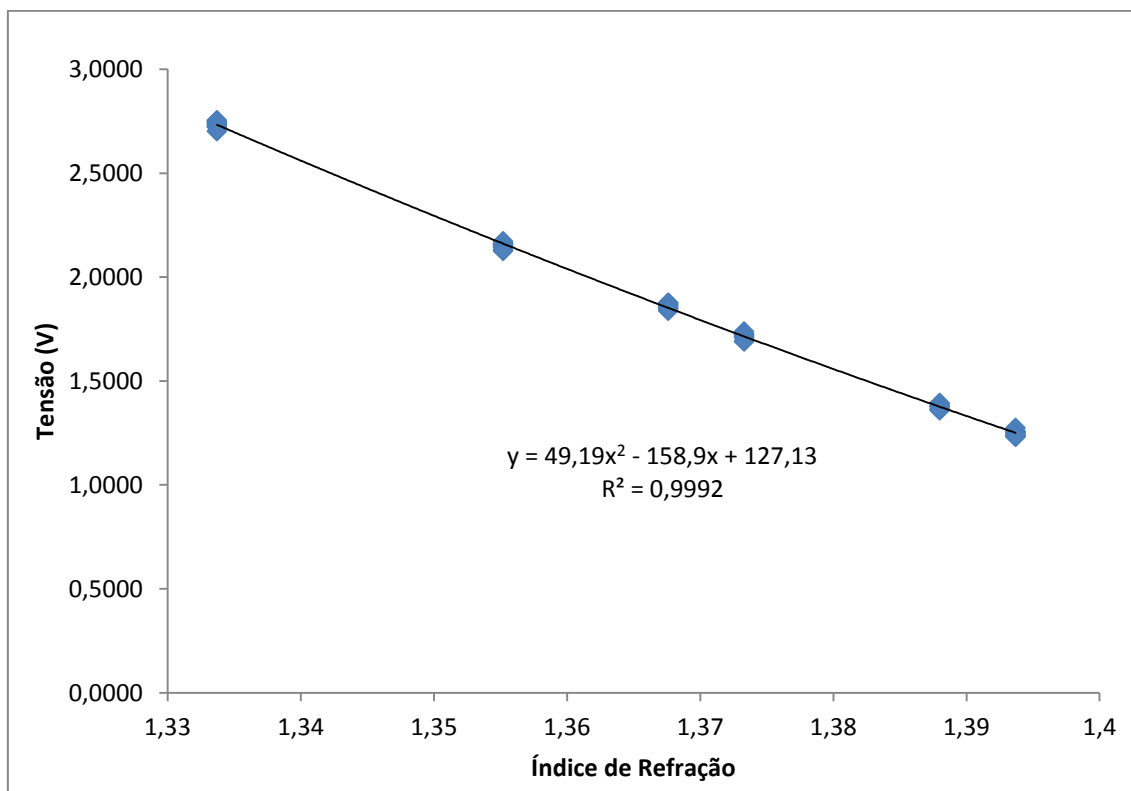


Figura 5.3: Tensão em função do índice de refração do sensor 1 da fibra de 1 mm sem casca.

A partir do polinômio de ajuste são encontrados os valores de referência da tensão no sensor para os respectivos valores de índices de refração Tabela 5.13,

Tabela 5.13: Valores de referência das tensões do sensor 1 de fibra de 1 mm sem casca.

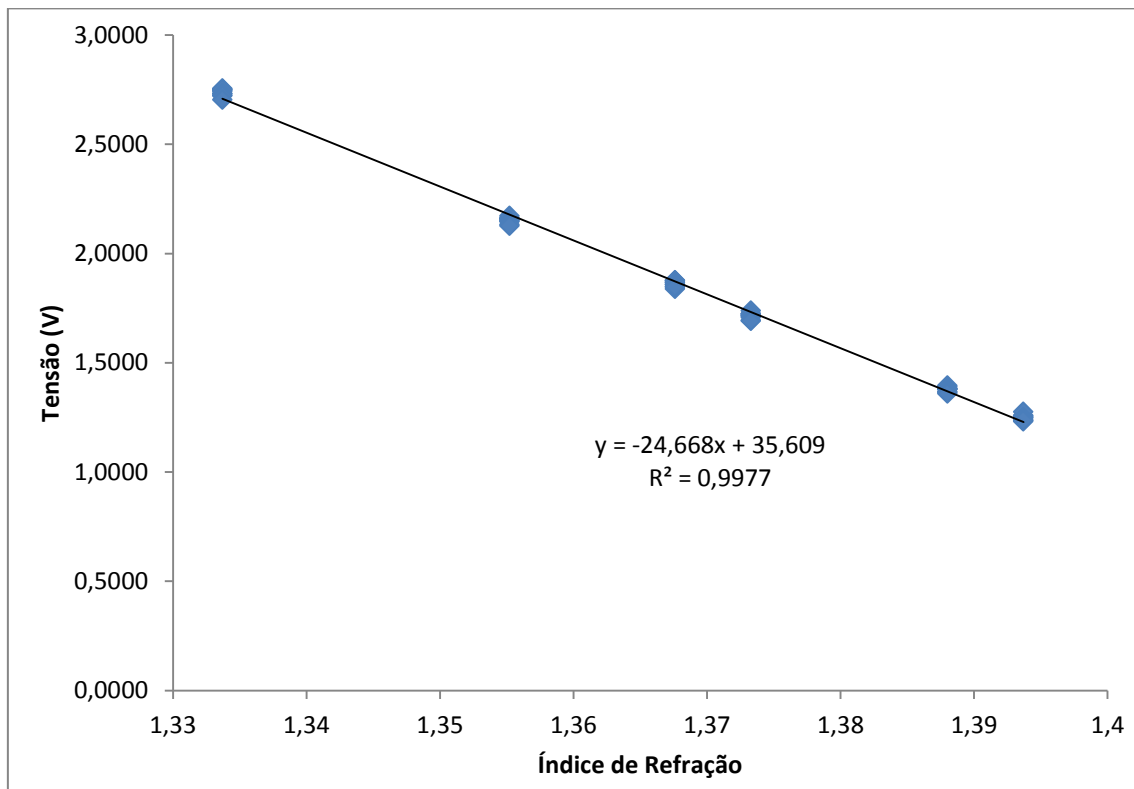
<b>n de referência</b>	<b>Referência da Tensão (V)</b>
1,334	2,7331
1,3552	2,1611
1,3676	1,8519
1,3733	1,7148
1,3880	1,3760
1,3937	1,2504

### 5.2.1 Avaliação das incertezas – padrão do sensor

Anteriormente o ajuste da curva do sensor foi feito considerando-se um polinômio do primeiro grau, conforme exemplificado para este sensor na Figura 5.4. Entretanto, observando-se apenas o valor do coeficiente de determinação desta curva ( $R^2 = 0,9977$ ) é fácil constatar pela observação da Figura 5.3 que um polinômio do segundo grau

permite um ajuste bem melhor da curva de tendência ( $R^2 = 0,9992$ ). Este valor demonstra que o modelo empregado resolve muito bem a relação entre os valores de tensão medidos e os índices de refração de referência. Este teste foi realizado para todos os sensores antes de se definir o polinômio do segundo grau como mensurando, conforme descrito no capítulo 4.

Considerando-se então o polinômio do segundo grau, o gráfico de resíduos, Figura 5.5, também indica que, a distribuição dos valores experimentais tem o número de resíduos positivos e negativos aproximadamente iguais. Os resíduos não apresentam nenhuma tendência ao longo dos valores de índice de refração, atendendo assim a condição de homocedasticidade.



**Figura 5.4:** Tensão em função do índice de refração ajustada por polinômio do 1º grau do sensor 1 da fibra de 1 mm sem casca.

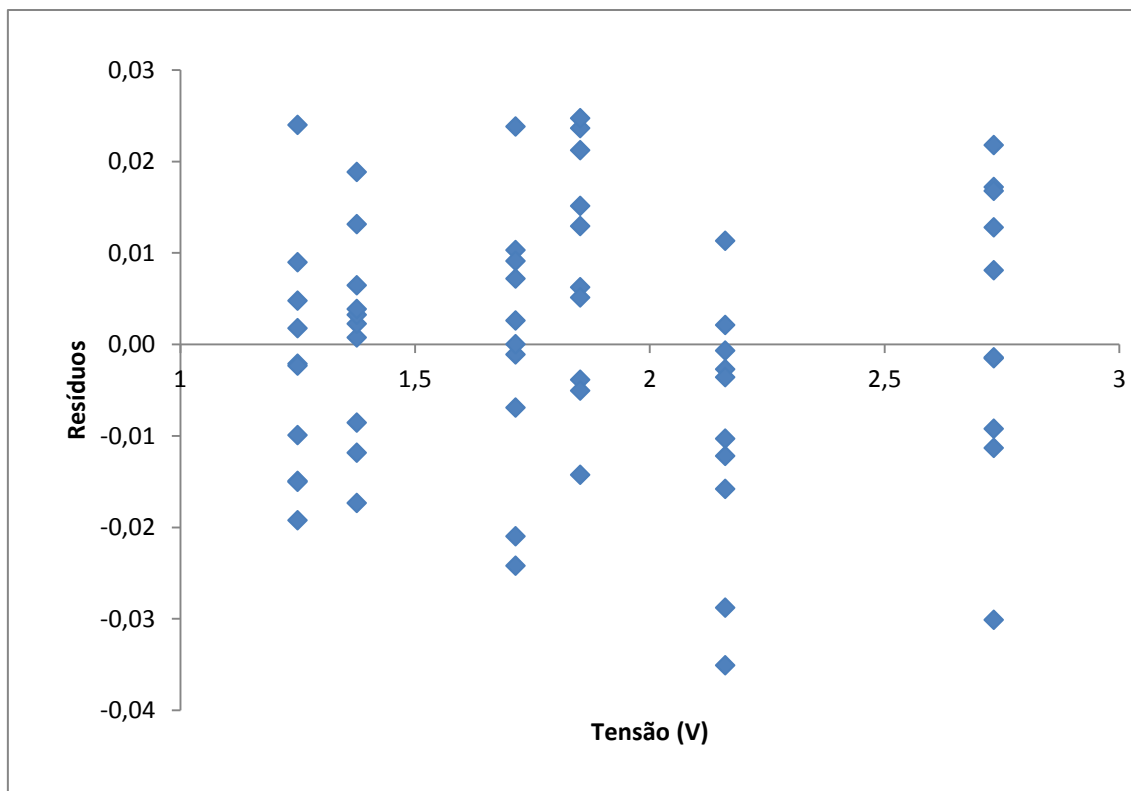


Figura 5.5: Resíduos das tensões em volts do sensor 1 da fibra de 1 mm sem casca.

O cálculo da incerteza-padrão dos coeficientes é o mesmo empregado para o caso das concentrações, equação (4.11). A Tabela 5.14 indica os valores encontrados com suas respectivas unidades.

Tabela 5.14: Incerteza padrão dos coeficientes do polinômio do segundo grau de ajuste.

$ub_0$ (V)	$ub_1$ (V)	$ub_2$ (V)
9,1249	13,3803	4,9042

Estes valores também são utilizados nos cálculos dos índices de refração pelo sensor. O novo mensurando é definido pela Equação (4.5). A partir desta equação pode-se finalmente determinar o valor do índice de refração para as soluções de sacarose a partir do sensor a fibra óptica.

O gráfico de resíduos gerado pelos valores do novo mensurando índice de refração, Figura 5.6, possui as mesmas características positivas do gráfico de resíduos dos valores em volts, o que valida também esta modelagem.

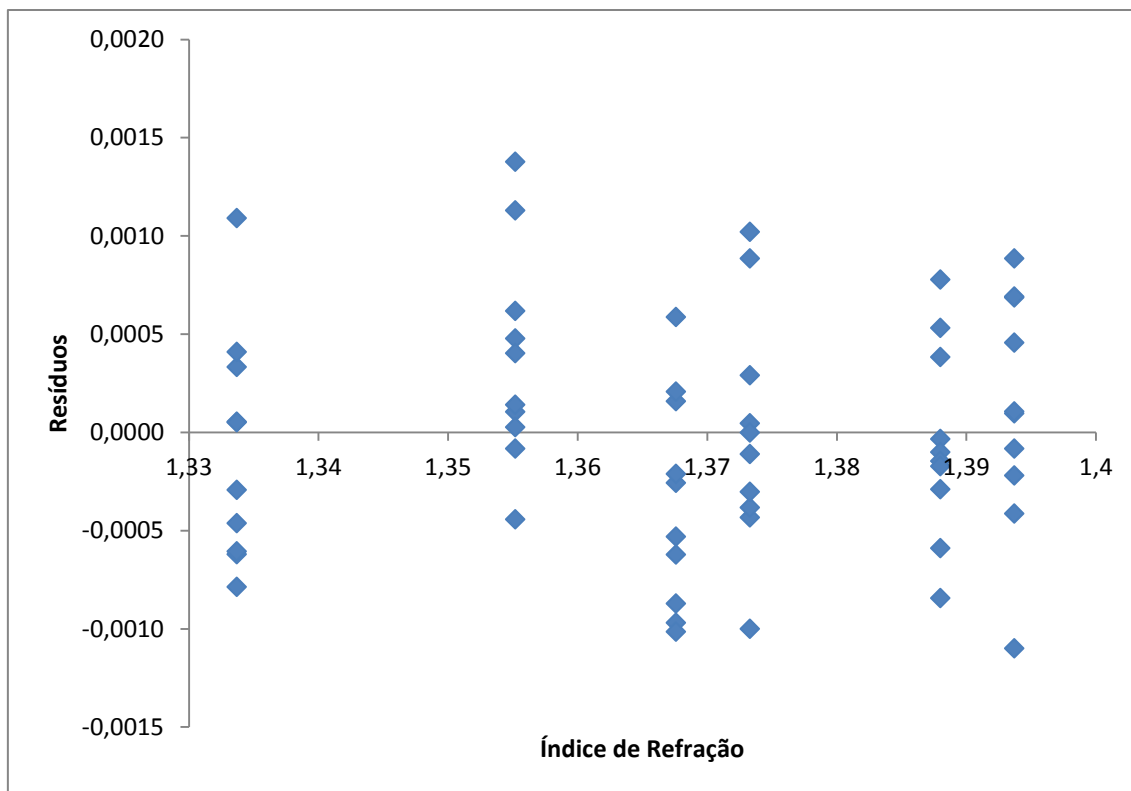


Figura 5.6: Resíduos dos índices de refração do sensor 1 da fibra de 1 mm sem casca.

## 5.2.2 Coeficientes de sensibilidade do sensor

A Tabela 5.15 indica os coeficientes de sensibilidade das tensões como mensurando, calculados a partir das Equações (4.19), (4.20), (4.21) e (4.22). A Tabela 5.16 indica os coeficientes de sensibilidade dos índice de refração como mensurando, calculados a partir das Equações (4.23), (4.24), (4.25) e (4.26). Apesar de se utilizar os mesmos coeficientes para a curva inversa, observa-se que as sensibilidades associadas são diferentes, pois são calculadas a partir das derivadas parciais.

Tabela 5.15: Coeficientes de sensibilidade da tensão como mensurando.

<b>n de referência</b>	<b>cb<sub>0</sub></b>	<b>cb<sub>1</sub></b>	<b>cb<sub>2</sub></b>	<b>c<sub>n</sub> (V)</b>
<b>1,334</b>	1	1,3337	1,7788	-27,6632
<b>1,3552</b>	1	1,3552	1,8366	-25,5479
<b>1,3676</b>	1	1,3676	1,8703	-24,3279
<b>1,3733</b>	1	1,3733	1,8860	-23,7671
<b>1,3880</b>	1	1,3880	1,9265	-22,3208
<b>1,3937</b>	1	1,3937	1,9424	-21,7600

Tabela 5.16: Coeficientes de sensibilidade do índice de refração do sensor como mensurando.

<b>n de referência</b>	<b>cb<sub>0S</sub></b>	<b>cb<sub>1S</sub></b>	<b>cb<sub>2S</sub></b>	<b>c<sub>V</sub></b>
<b>1,334</b>	0,03615	0,04821	0,06430	-0,03615
<b>1,3552</b>	0,03914	0,05305	0,07189	-0,03914
<b>1,3676</b>	0,04111	0,05622	0,07688	-0,04111
<b>1,3733</b>	0,04207	0,05778	0,07935	-0,04207
<b>1,3880</b>	0,04480	0,06218	0,08631	-0,04480
<b>1,3937</b>	0,04596	0,06405	0,08927	-0,04596

### 5.2.3 Incerteza-padrão combinada do sensor

As incertezas-padrão combinada das tensões de referência calculadas a partir da Equação (4.34) são apresentadas na Tabela 5.17. As incertezas-padrão combinada dos índices de refração medidos pelo sensor, calculadas a partir da Equação (4.35) são apresentadas na Tabela 5.18.

Tabela 5.17: Incerteza-padrão combinada das tensões.

<b>Tensão de referência (V)</b>	<b>2,73</b>	<b>2,16</b>	<b>1,852</b>	<b>1,714</b>	<b>1,376</b>	<b>1,250</b>
<b>u<sub>c</sub>(V) (V)</b>	3,46x10 <sup>-2</sup>	9,83x10 <sup>-3</sup>	7,39x10 <sup>-3</sup>	8,02x10 <sup>-3</sup>	7,64x10 <sup>-3</sup>	9,43x10 <sup>-3</sup>

Tabela 5.18: Incerteza-padrão combinada dos índices de refrações

<b>n de referência</b>	<b>1,334</b>	<b>1,3552</b>	<b>1,3676</b>	<b>1,3733</b>	<b>1,3880</b>	<b>1,3937</b>
<b>u<sub>c</sub>(n<sub>s</sub>)</b>	1,26x10 <sup>-3</sup>	4,00x10 <sup>-4</sup>	3,24x10 <sup>-4</sup>	3,54x10 <sup>-4</sup>	3,63x10 <sup>-4</sup>	4,66x10 <sup>-4</sup>

Observa-se que a incerteza da medida de tensão é uma ordem de grandeza maior do que incerteza da medida do índice de refração. A incerteza da medida do índice de refração feita pelo sensor possui a mesma ordem de grandeza da medida feita pelo refratômetro, o que demonstra a eficiência do sensor.

A seguir, a Tabela 5.19 apresenta o resultado geral das medidas com as respectivas incertezas calculadas, facilitando a visualização dos resultados de todo o processo estatístico para este sensor.



Tabela 5.19: Resultado geral do sensor 1 da fibra de 1 mm sem casca.

Concentração (g/mL)	n	Tensão (V)	n <sub>s</sub>
Água pura	1,334 ± 0,001	2,73 ± 0,03	1,334 ± 0,001
0,1500 ± 0,0009	1,3552 ± 0,0004	2,16 ± 0,01	1,3552 ± 0,0004
0,250 ± 0,001	1,3676 ± 0,0003	1,852 ± 0,007	1,3676 ± 0,0003
0,300 ± 0,002	1,3733 ± 0,0003	1,714 ± 0,008	1,3733 ± 0,0004
0,450 ± 0,003	1,3880 ± 0,0003	1,376 ± 0,008	1,3880 ± 0,0004
0,520 ± 0,003	1,3937 ± 0,0004	1,250 ± 0,008	1,3937 ± 0,0005

### 5.3 Comparação entre os sensores

A seguir será apresentada a comparação dos resultados encontrados para os quatro tipos de sensores investigados.

#### 5.3.1 Comparação das incertezas em volts

A comparação dos resultados finais das incertezas em volts mostram que, de um modo geral, os sensores possuem uma boa repetitividade, da ordem de  $10^{-3}$  V. Os melhores resultados das medidas em termos da repetitividade foram apresentados pelos sensores de fibra óptica com casca de 1 mm sem *taper* na Tabela 5.22 e Figura 5.8. A expectativa era de que os sensores de 1 mm com *taper*, Tabela 5.20 e Figura 5.7, apresentassem melhores resultados em relação aos sem *taper*. A deformação causada na fibra durante a fabricação do *taper* pode ter causado a perda indesejada de luz no sensor.

O sensores com fibras sem casca e sem *taper*, Tabela 5.21 e Figura 5.9, também apresentaram bons resultados. Há um interesse nestes sensores por serem fabricados com fibra de PMMA. O protocolo para fixar anti-corpos neste material já é bem conhecido. Isto facilitará os procedimentos com utilização de bactérias assim, mesmo que seus resultados não sejam os melhores, há uma grande chance das pesquisas futuras utilizarem este sensor.

O pior resultado apresentado foi o do sensor de fibra sem casca de 0,45 mm, da ordem de  $10^{-2}$  V, Tabela 5.23 e Figura 5.10. Neste sensor o suporte foi trocado por um com um furo menor, para um melhor ajuste da fibra. Como o LED e o fotodiodo utilizados foram os mesmos, e a parte superior do suporte é igual. Considera-se então

que a intensidade luminosa que passa pela fibra neste sensor é bem menor. Observa-se que os valores de tensão medidos nestes sensores são menores, permitindo que os níveis de ruído no Amplificador *Lock-in* fiquem mais próximos do valor do sinal medido.

Tabela 5.20: Incertezas da medição em volts dos sensores com fibra de 1 mm com casca e com *taper*

<b>n<sub>ref</sub></b>	<b>Sensor 1</b>	<b>Sensor 2</b>	<b>Sensor 3</b>	<b>Sensor 4</b>	<b>Sensor 5</b>
<b>1,334</b>	0,04	0,04	0,05	0,04	0,03
<b>1,3552</b>	0,01	0,02	0,02	0,01	0,009
<b>1,3676</b>	0,008	0,01	0,02	0,009	0,007
<b>1,3733</b>	0,009	0,01	0,02	0,009	0,008
<b>1,3880</b>	0,008	0,01	0,02	0,009	0,007
<b>1,3937</b>	0,01	0,02	0,02	0,01	0,009

Tabela 5.21: Incertezas da medição em volts dos sensores com fibra de 1 mm sem casca

<b>n<sub>ref</sub></b>	<b>Sensor 1</b>	<b>Sensor 2</b>	<b>Sensor 3</b>	<b>Sensor 4</b>	<b>Sensor 5</b>
<b>1,334</b>	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03
<b>1,3552</b>	0,01	0,02	0,009	0,01	0,01
<b>1,3676</b>	0,007	0,02	0,007	0,01	0,009
<b>1,3733</b>	0,008	0,01	0,007	0,01	0,009
<b>1,3880</b>	0,008	0,02	0,007	0,01	0,009
<b>1,3937</b>	0,009	0,02	0,009	0,01	0,01

Tabela 5.22: Incertezas da medição em volts dos sensores com fibra de 1 mm com casca e sem *taper*

<b>n<sub>ref</sub></b>	<b>Sensor 1</b>	<b>Sensor 2</b>	<b>Sensor 3</b>	<b>Sensor 4</b>	<b>Sensor 5</b>
<b>1,334</b>	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02
<b>1,3552</b>	0,006	0,007	0,004	0,005	0,005
<b>1,3676</b>	0,005	0,006	0,003	0,005	0,004
<b>1,3733</b>	0,005	0,006	0,004	0,004	0,004
<b>1,3880</b>	0,005	0,006	0,003	0,005	0,004
<b>1,3937</b>	0,007	0,008	0,004	0,006	0,005

Tabela 5.23: Incertezas da medição em volts dos sensores com fibra de 0,45 mm sem casca

$n_{ref}$	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Sensor 5
<b>1,334</b>	0,02	0,03	0,02	0,03	0,02
<b>1,3552</b>	0,02	0,01	0,008	0,01	0,01
<b>1,3676</b>	0,02	0,01	0,008	0,01	0,01
<b>1,3733</b>	0,02	0,01	0,008	0,01	0,01
<b>1,3880</b>	0,02	0,01	0,008	0,01	0,01
<b>1,3937</b>	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02

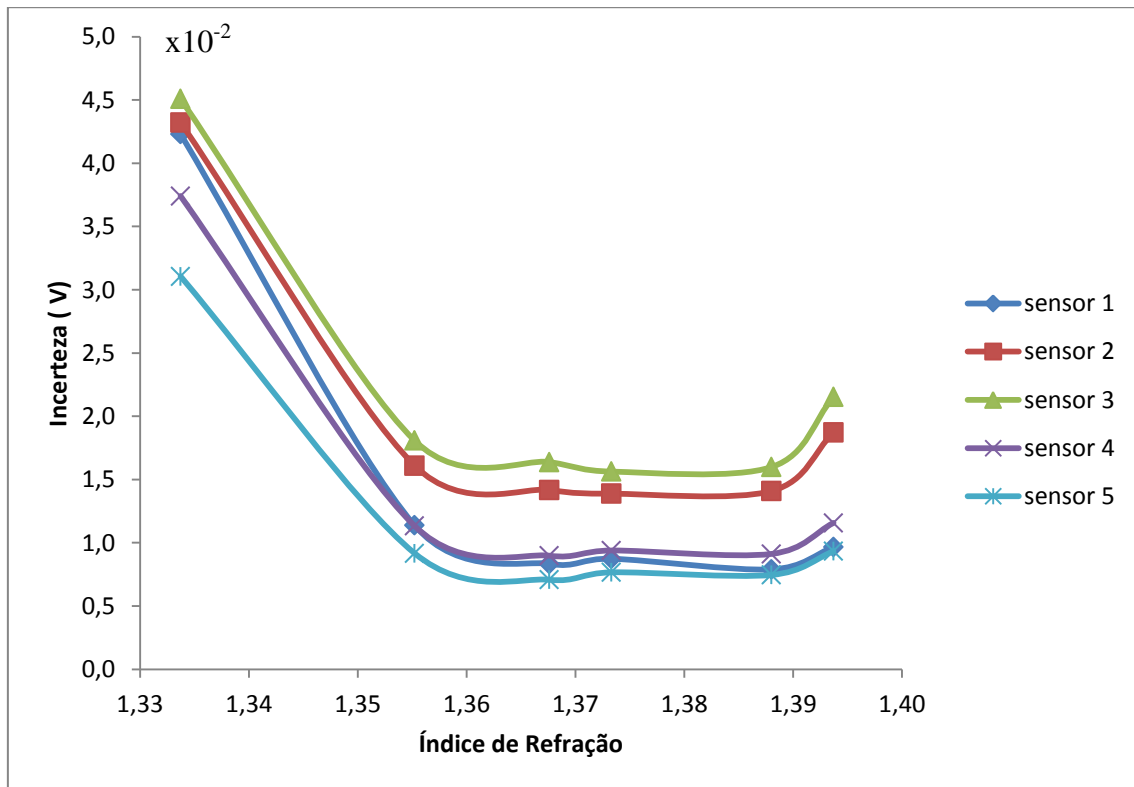


Figura 5.7: Comparação das incertezas da medição em volts dos sensores com fibra de 1 mm com casca e com taper

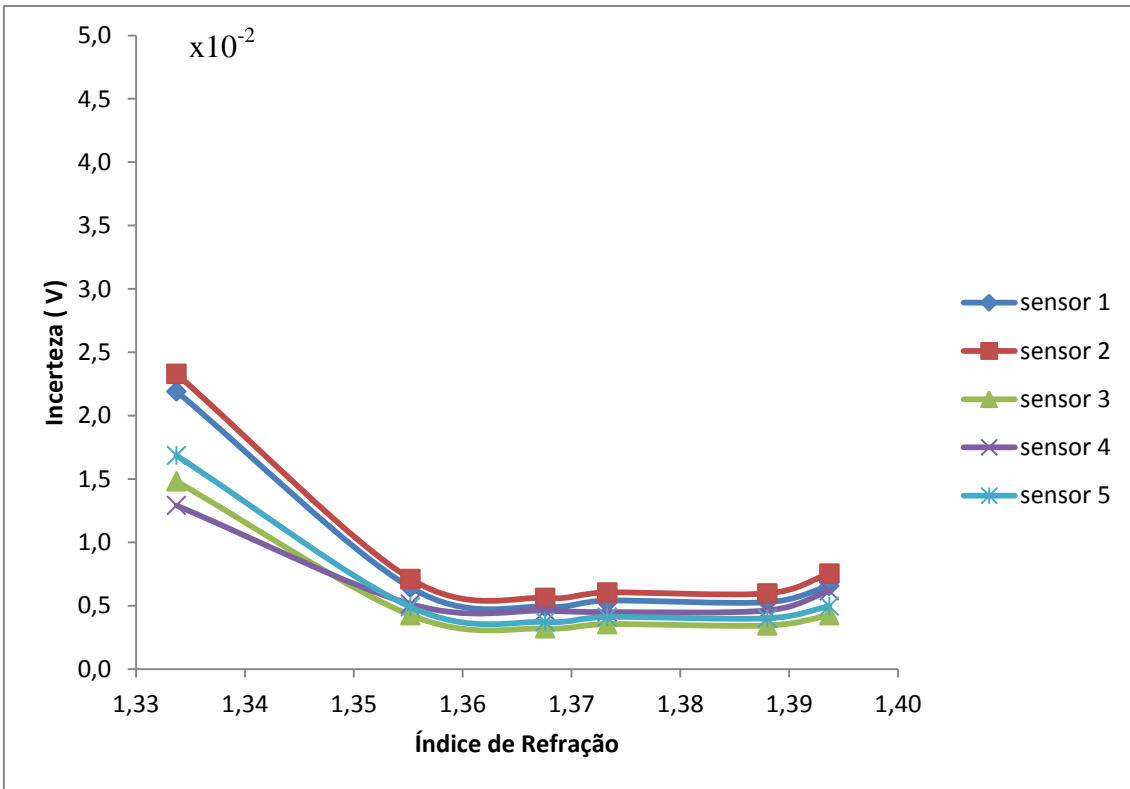


Figura 5.8: Comparação das incertezas da medição em volts dos sensores com fibra de 1 mm com casca e sem taper

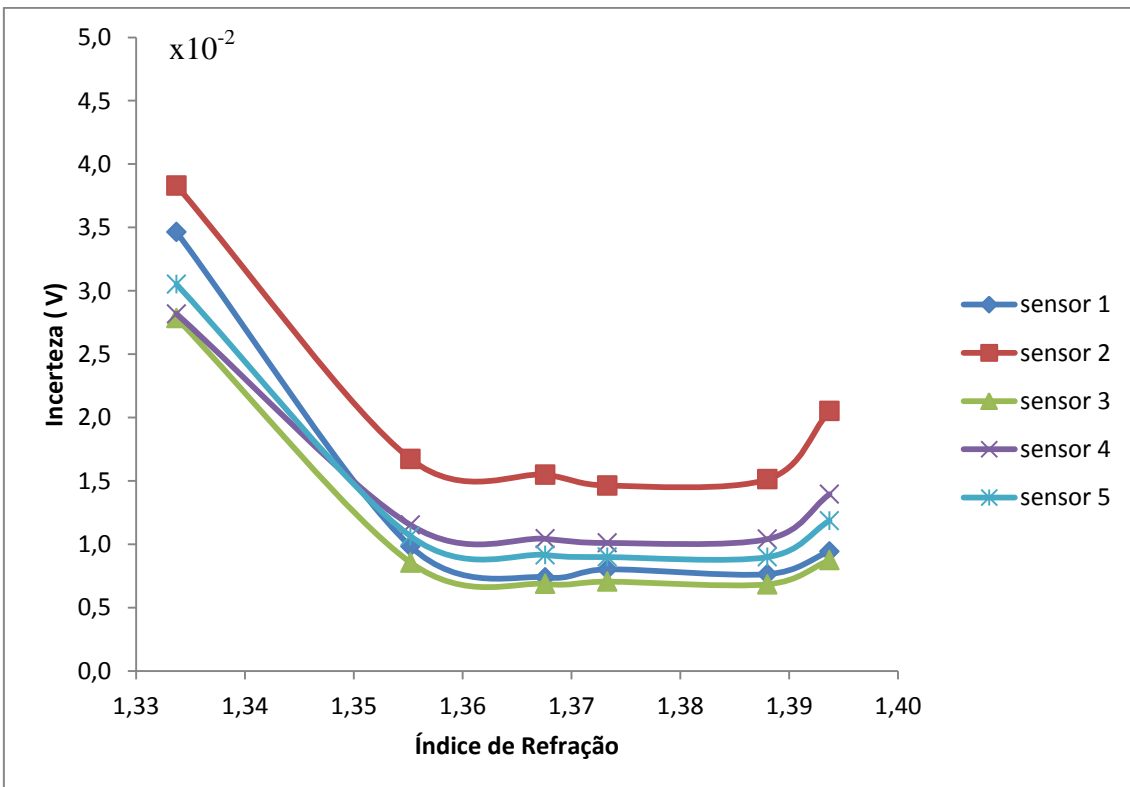


Figura 5.9: Comparação das incertezas da medição em volts dos sensores com fibra de 1 mm sem casca

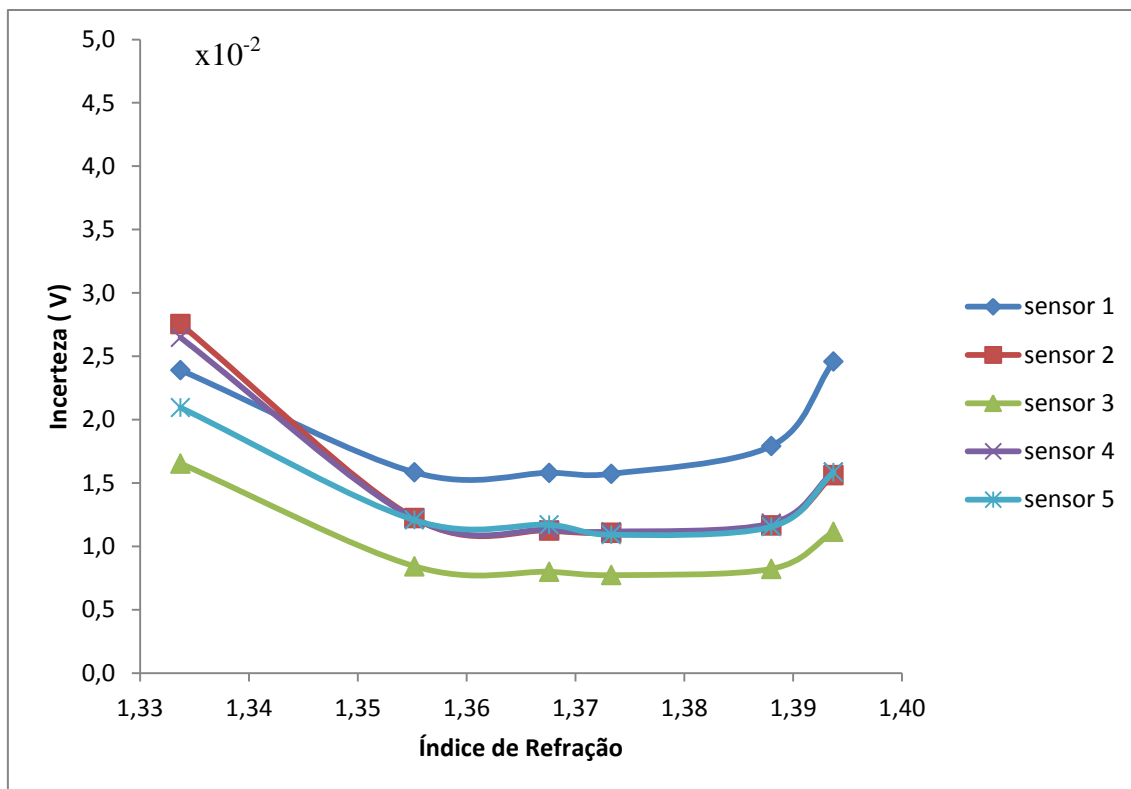


Figura 5.10: Comparação das incertezas da medição em volts dos sensores com fibra de 0,45 mm sem casca

### 5.3.2 Comparação das incertezas em índice de refração

As incertezas nos sensores após passar os resultados para índices de refração apresentam valores menores do que as incertezas dos valores de tensão em todos os sensores de 1 mm com casca com *taper* na Tabela 5.24 e Figura 5.11, sem *taper* na Tabela 5.26 e Figura 5.12, sem casca na Tabela 5.25 e Figura 5.13. Os melhores resultados são da ordem de  $10^{-4}$ . Os sensores a fibra óptica de 1 mm sem *taper* apresentaram resultados ainda melhores.

Da mesma maneira, os sensores com fibras de 0,45 mm, Tabela 5.27 e Figura 5.14, tem resultados da ordem de  $10^{-3}$ .

Os resultados encontrados são bem próximos aos valores de referência do refratômetro, mostrando que o processo de ajuste utilizando uma equação do segundo grau mostrou-se eficiente para resolver os valores de tensão em função das concentrações, sendo ainda melhor o resultado da função inversa para expressão dos valores de índice de refração pelo sensor.

Tabela 5.24: Incertezas da medição em índice de refração dos sensores com fibra de 1 mm com casca e com taper

$n_{ref}$	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Sensor 5
<b>1,334</b>	0,001	0,002	0,002	0,001	0,001
<b>1,3552</b>	0,0004	0,0007	0,0009	0,0005	0,0004
<b>1,3676</b>	0,0004	0,0007	0,0009	0,0004	0,0003
<b>1,3733</b>	0,0004	0,0007	0,0009	0,0004	0,0004
<b>1,3880</b>	0,0004	0,0008	0,001	0,0005	0,0004
<b>1,3937</b>	0,0005	0,001	0,002	0,0006	0,0005

Tabela 5.25: Incertezas da medição em índice de refração dos sensores com fibra de 1 mm sem casca

$n_{ref}$	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Sensor 5
<b>1,334</b>	0,001	0,002	0,001	0,002	0,001
<b>1,3552</b>	0,0004	0,001	0,0005	0,0008	0,0007
<b>1,3676</b>	0,0003	0,001	0,0005	0,0008	0,0006
<b>1,3733</b>	0,0004	0,001	0,0005	0,0008	0,0006
<b>1,3880</b>	0,0004	0,001	0,0005	0,0009	0,0007
<b>1,3937</b>	0,0005	0,002	0,0007	0,001	0,001

Tabela 5.26: Incertezas da medição em índice de refração dos sensores com fibra de 1 mm com casca e sem taper

$n_{ref}$	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Sensor 5
<b>1,334</b>	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001
<b>1,3552</b>	0,0004	0,0004	0,0004	0,0008	0,0004
<b>1,3676</b>	0,0003	0,0004	0,0003	0,0007	0,0003
<b>1,3733</b>	0,0003	0,0004	0,0003	0,0007	0,0003
<b>1,3880</b>	0,0004	0,0004	0,0003	0,0008	0,0003
<b>1,3937</b>	0,0005	0,0005	0,0004	0,001	0,0004

Tabela 5.27: Incertezas da medição em índice de refração dos sensores com fibra de 0,45 mm sem casca

$n_{ref}$	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Sensor 5
<b>1,334</b>	0,01	0,002	0,002	0,002	0,004
<b>1,3552</b>	0,001	0,0008	0,001	0,0008	0,002
<b>1,3676</b>	0,0009	0,0008	0,001	0,0008	0,002
<b>1,3733</b>	0,0008	0,0007	0,0009	0,0007	0,002
<b>1,3880</b>	0,0007	0,0007	0,0009	0,0007	0,002
<b>1,3937</b>	0,0008	0,001	0,001	0,0009	0,003

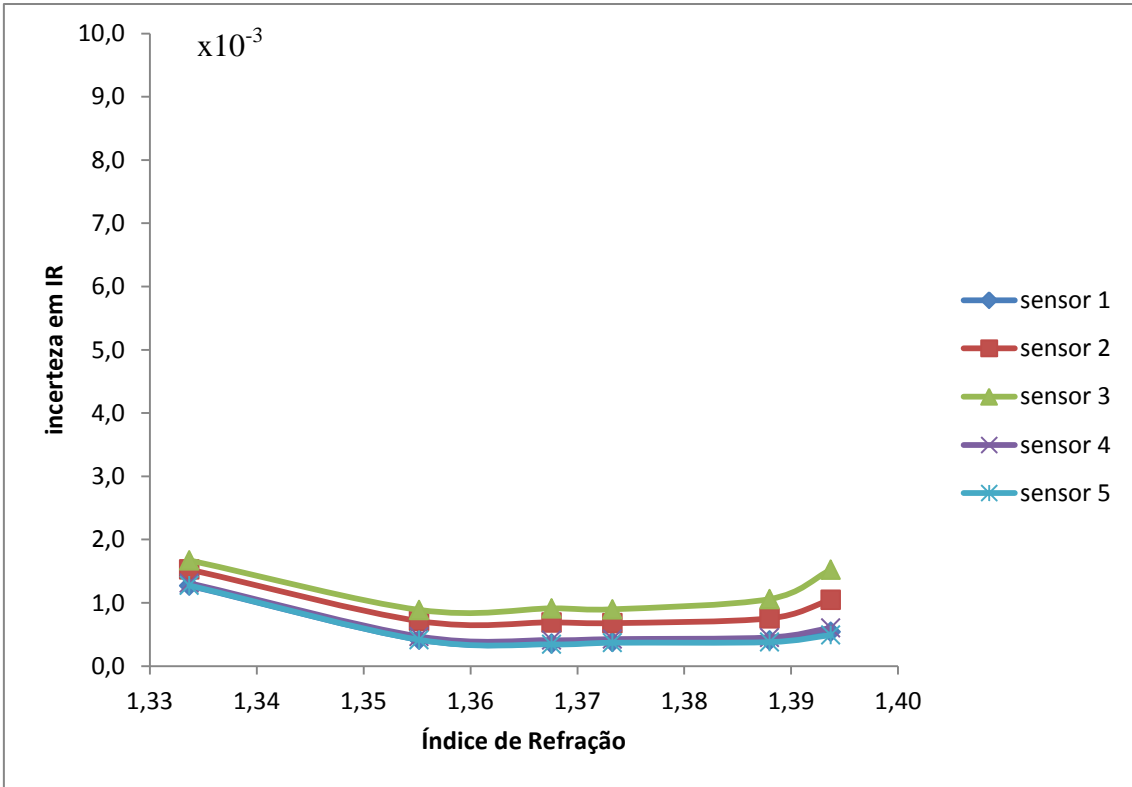


Figura 5.11: Comparação das incertezas da medição em índice de refração dos sensores com fibra de 1 mm com casca e com taper

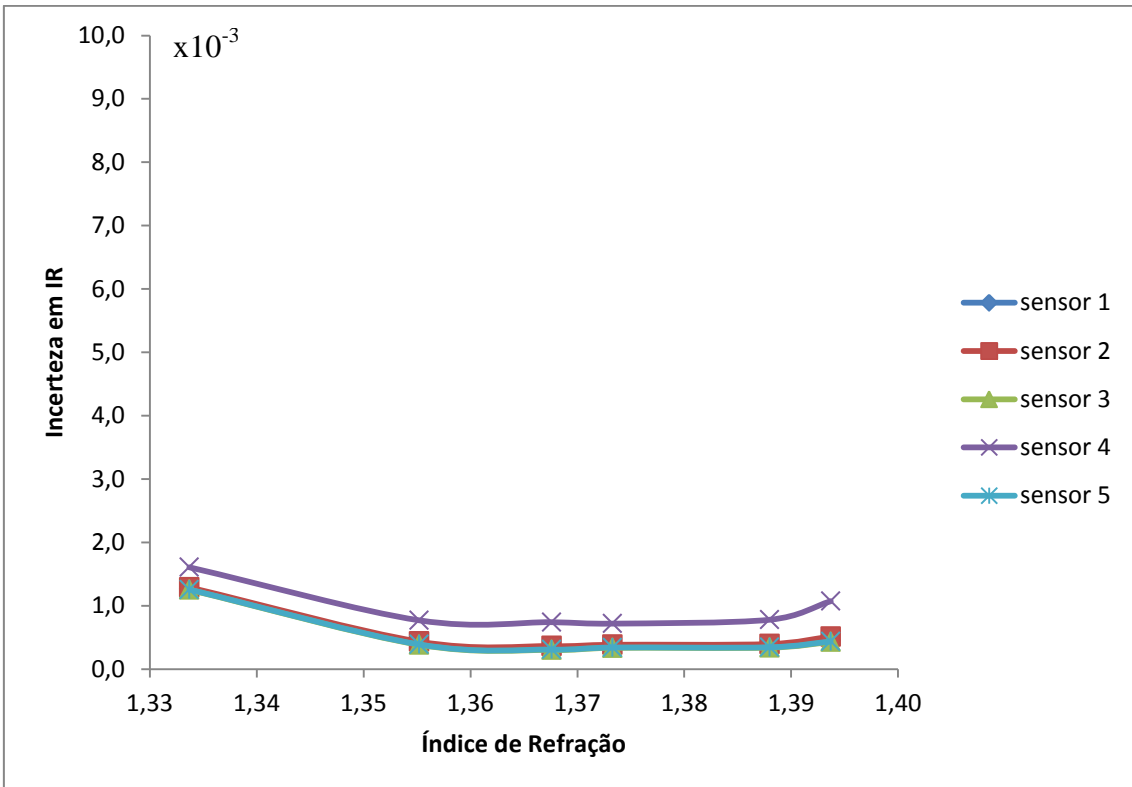


Figura 5.12: Comparação das incertezas da medição em índice de refração dos sensores com fibra de 1 mm com casca e sem taper

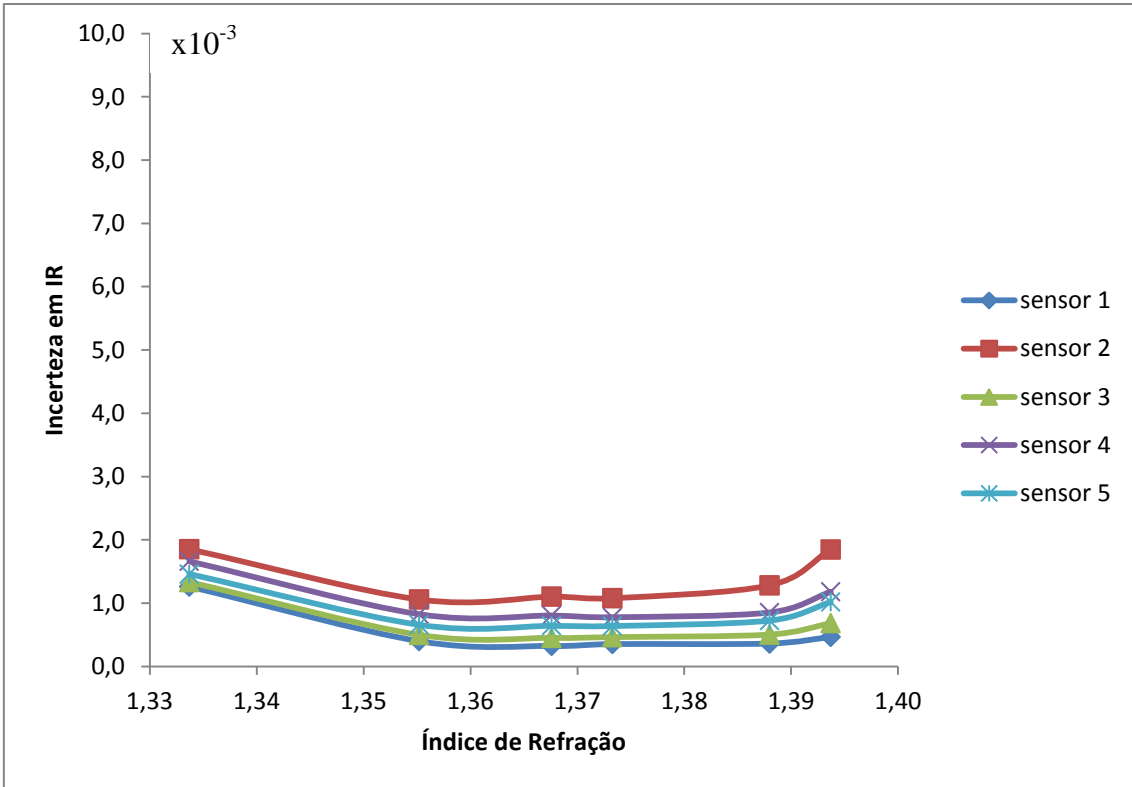


Figura 5.13: Comparação das incertezas da medição em índice de refração dos sensores com fibra de 1 mm sem casca

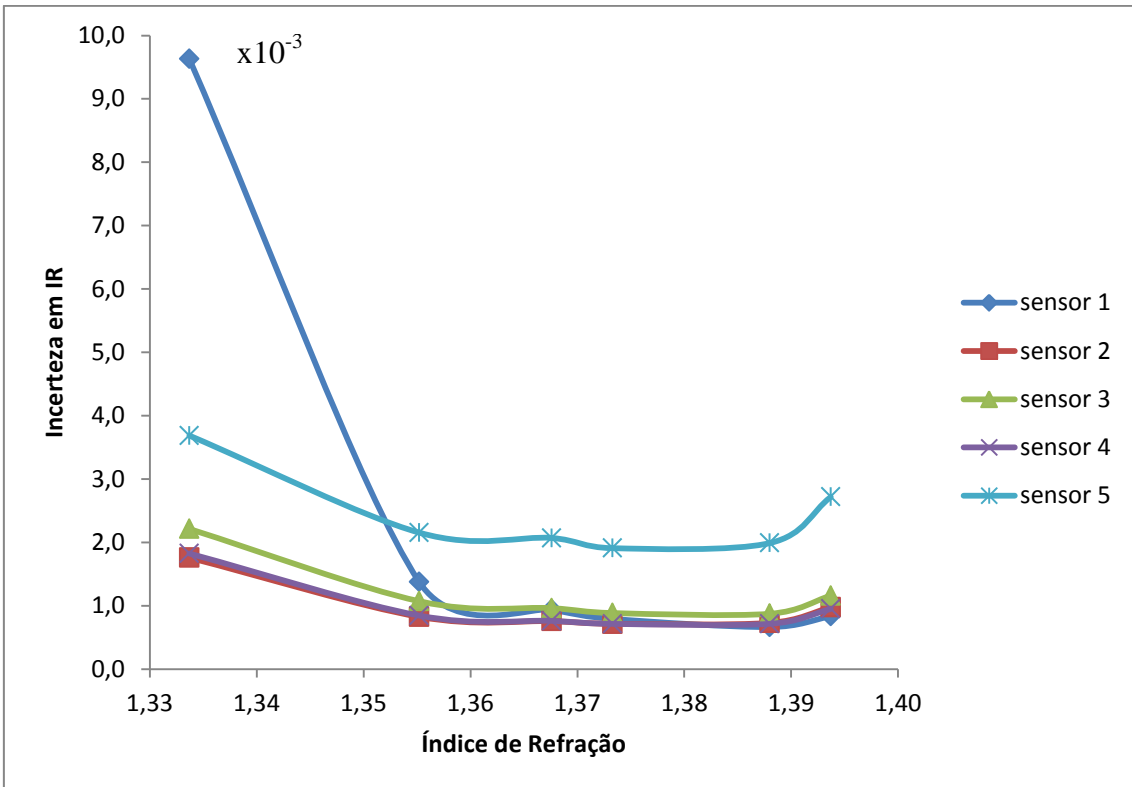


Figura 5.14: Comparação das incertezas da medição em índice de refração dos sensores com fibra de 0,45 mm sem casca



### 5.3.3 Comparação das sensibilidades

Observa-se que a sensibilidade dos sensores a fibra óptica de 1 mm com *taper* na Tabela 5.28 e Figura 5.15, sem *taper* na Tabela 5.30 e Figura 5.16 e sem casca na Tabela 5.29 e Figura 5.17 foi aproximadamente igual, apresentando uma queda normalizada de até 0,6 V/V na faixa estudada. Os sensores a fibra óptica de 0,45 mm possuem resultados mais irregulares, Tabela 5.31 e Figura 5.18.

Tabela 5.28: Sensibilidade normalizada (V/V) dos sensores com fibra de 1 mm com casca e com *taper*

$n_{ref}$	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Sensor 5
<b>1,334</b>	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
<b>1,3552</b>	0,786	0,798	0,789	0,775	0,798
<b>1,3676</b>	0,678	0,690	0,681	0,654	0,687
<b>1,3733</b>	0,632	0,642	0,635	0,600	0,637
<b>1,3880</b>	0,524	0,525	0,525	0,468	0,512
<b>1,3937</b>	0,486	0,482	0,486	0,419	0,465

Tabela 5.29: Sensibilidade normalizada (V/V) dos sensores com fibra de 1 mm com sem casca

$n_{ref}$	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Sensor 5
<b>1,334</b>	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
<b>1,3552</b>	0,791	0,780	0,767	0,799	0,768
<b>1,3676</b>	0,678	0,667	0,644	0,690	0,646
<b>1,3733</b>	0,627	0,619	0,590	0,641	0,594
<b>1,3880</b>	0,503	0,505	0,459	0,519	0,467
<b>1,3937</b>	0,458	0,464	0,411	0,473	0,422

Tabela 5.30: Sensibilidade normalizada (V/V) dos sensores com fibra de 1 mm com casca e sem *taper*

$n_{ref}$	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Sensor 5
<b>1,334</b>	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
<b>1,3552</b>	0,781	0,799	0,811	0,818	0,808
<b>1,3676</b>	0,658	0,686	0,706	0,717	0,701
<b>1,3733</b>	0,603	0,635	0,659	0,672	0,653
<b>1,3880</b>	0,464	0,507	0,540	0,559	0,532
<b>1,3937</b>	0,412	0,458	0,495	0,517	0,486

Tabela 5.31: Sensibilidade normalizada (V/V) dos sensores com fibra de 0,45 mm sem casca

$n_{ref}$	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Sensor 5
<b>1,334</b>	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
<b>1,3552</b>	0,808	0,940	0,834	0,826	0,871
<b>1,3676</b>	0,701	0,872	0,728	0,719	0,794
<b>1,3733</b>	0,653	0,831	0,677	0,667	0,759
<b>1,3880</b>	0,532	0,703	0,538	0,529	0,667
<b>1,3937</b>	0,486	0,644	0,481	0,474	0,631

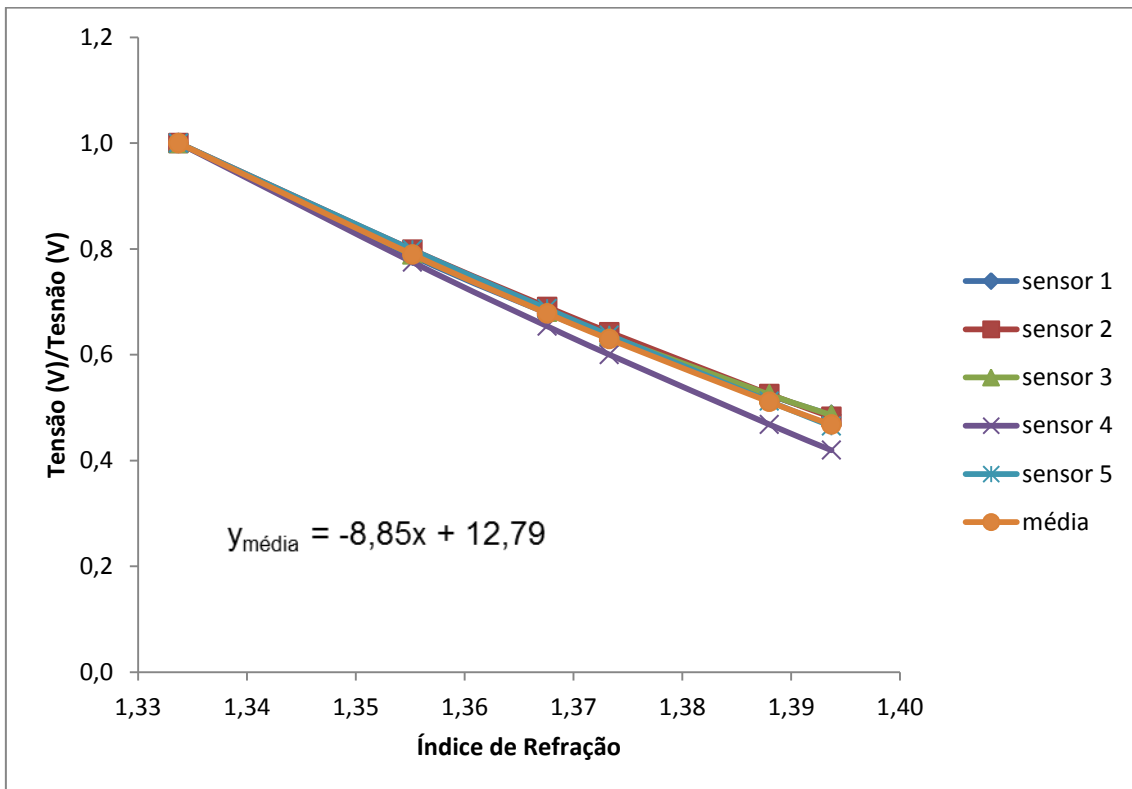


Figura 5.15: Comparação da sensibilidade normalizada dos sensores com fibra de 1 mm com casca e com taper

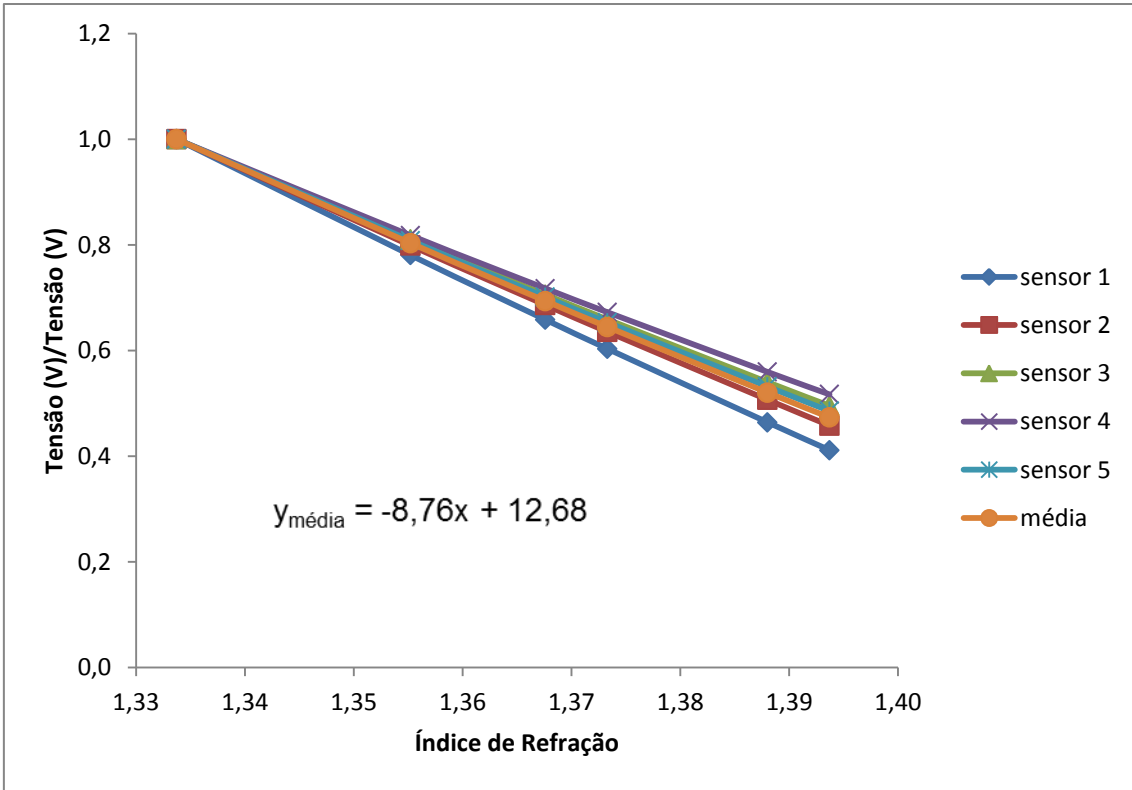


Figura 5.16: Comparação da sensibilidade normalizada dos sensores com fibra de 1 mm com casca e sem taper

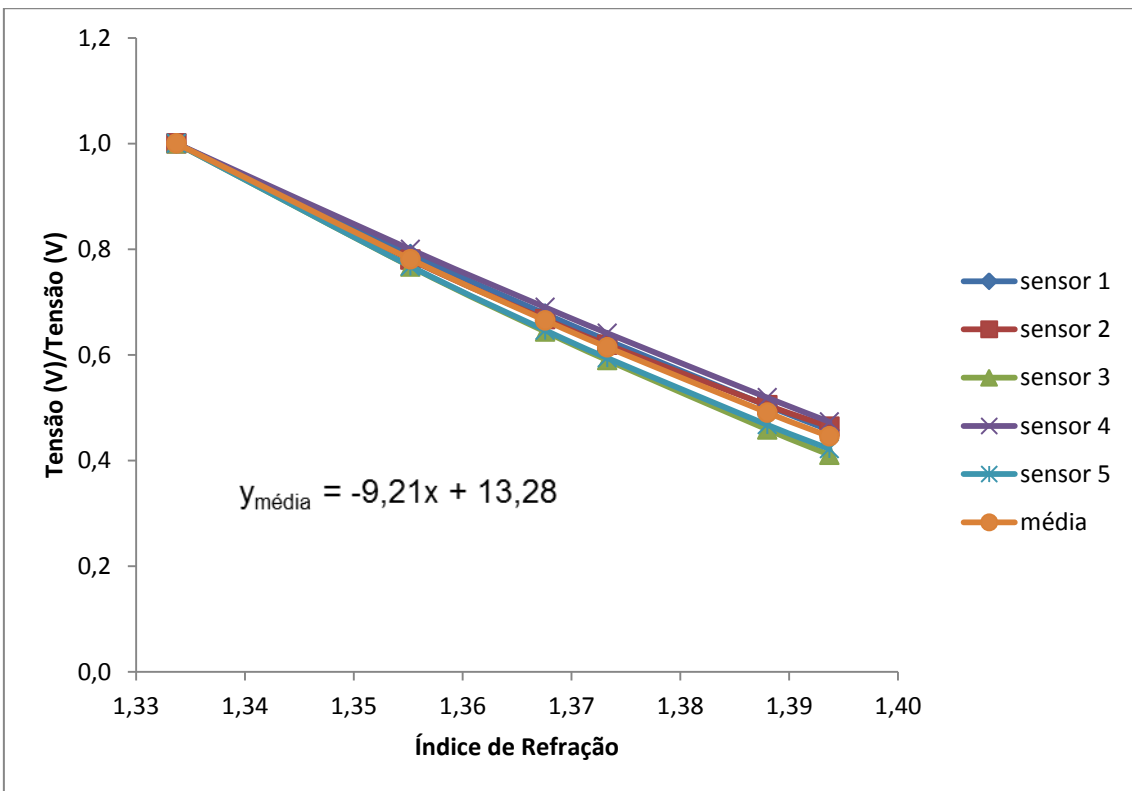


Figura 5.17: Comparação da sensibilidade normalizada dos sensores com fibra de 1 mm sem casca

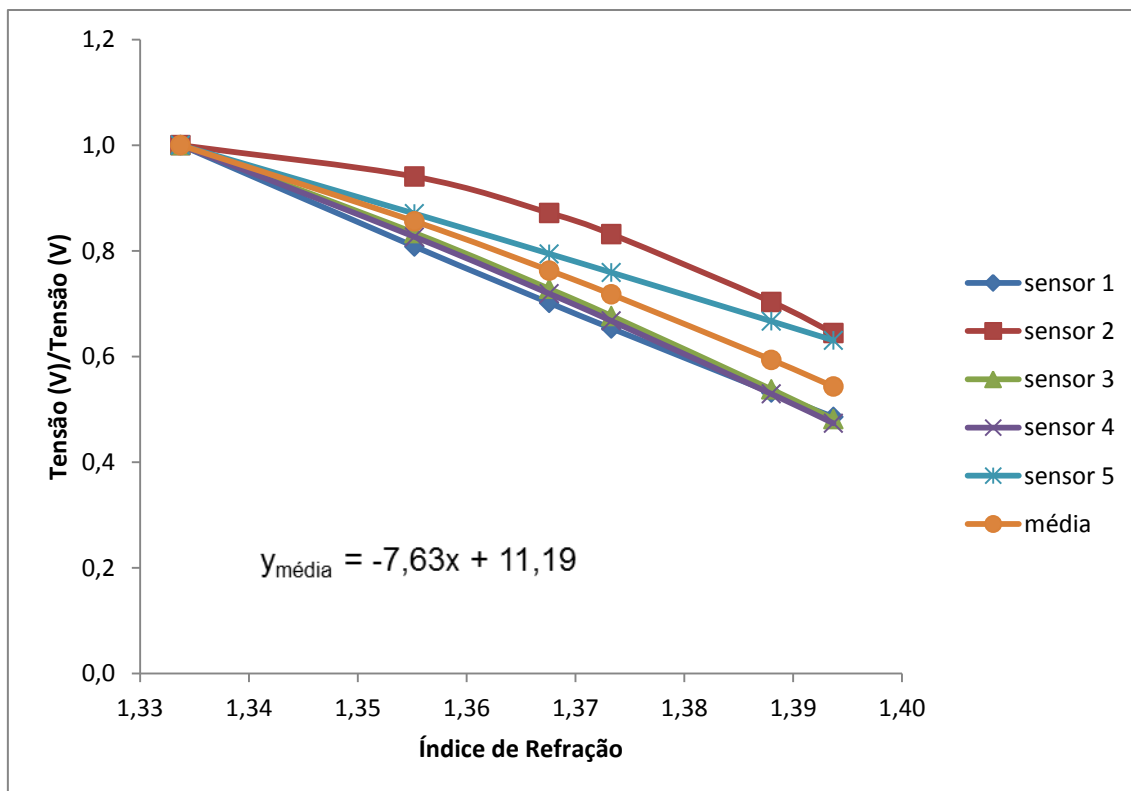


Figura 5.18: Comparação da sensibilidade normalizada dos sensores com fibra de 0,45 mm sem casca

A seguir a Tabela 5.32 apresenta os resultados médios dos quatro tipos de sensores produzidos para comparação. No experimento para validação da sacarose como índice de refração de referência o valor do índice da água pura não foi medido pelo refratômetro e sim calculado pela extrapolação da curva. Assim, seus resultados não refletem a incerteza real dos sensores. Nos cálculos das médias apresentados abaixo estes valores foram descartados.

Tabela 5.32: Comparação dos resultados médios de incertezas e sensibilidades dos sensores

Tipo de Fibra	Incerteza (V)	Incerteza (n)	Coefficiente de Sensibilidade Linear
<b>1 mm com casca e taper</b>	$1 \times 10^{-2}$	$6 \times 10^{-4}$	8,85
<b>1 mm com casca sem taper</b>	$5 \times 10^{-3}$	$5 \times 10^{-4}$	8,76
<b>1 mm sem casca</b>	$1 \times 10^{-2}$	$8 \times 10^{-4}$	9,21
<b>0,45 mm sem casca</b>	$1 \times 10^{-2}$	$1 \times 10^{-3}$	7,63

Observa-se que os sensores com fibra de 1 mm com casca e sem taper apresentaram os melhores resultados médios nas incertezas, sendo de  $5 \times 10^{-3}$  V e  $5 \times 10^{-4}$

em índice de refração. Já na sensibilidade, o maior coeficiente médio encontrado foi de 9,21 para os sensores com fibras de 1 mm sem casca.

# Capítulo 6

## Conclusão

Este trabalho apresentou a implementação e análise estatística da eficiência de quatro tipos de sensores a fibra óptica plástica para refratometria, baseados no campo evanescente, destinados a aplicação da análise da quantidade de bactérias em água. Todos os sensores desenvolvidos foram confeccionados na forma de U, pois este modelo já se mostrou mais eficiente em trabalhos anteriores. De acordo com o conteúdo apresentado, chegou-se as seguintes conclusões:

1. A inovação da utilização do *Lock-in* diminuiu a influência das interferências externas ao experimento.
2. O sistema implementado no Simulink<sup>®</sup>, simulador do Matlab<sup>®</sup> é de fácil utilização, possuindo também mobilidade.
3. A capacidade da placa de aquisição de 12 bits representa uma limitação para o sistema apresentar uma menor incerteza na medição.
4. A homogeneidade da solução de sacarose é diferente em cada concentração, tendo assim as soluções mais concentradas uma menor incerteza.
5. A solução de sacarose adere ao sensor com facilidade, provocando o aumentando da incerteza na medição.
6. O processo de ajuste utilizando uma equação do segundo grau mostrou-se eficiente para resolver os dados experimentais.
7. O método ISO GUM 2008, as análises dos resíduos e os coeficientes de determinação encontrados garantem a confiabilidade do modelo.
8. Os sensores a fibra óptica de 1 mm apresentaram os melhores resultados com repetitividade na ordem de  $10^{-4}$  em unidade de índice de refração, sendo o melhor resultado médio na incerteza de  $5 \times 10^{-4}$  para o sensor com fibra de 1 mm com casca e sem *taper*.
9. Para o diâmetro dos *tapers* confeccionados, não foi detectada uma diferença significativa entre os resultados dos sensores a fibra óptica de 1 mm com casca nas configurações com *taper* e sem *taper*.

10. A sensibilidade normalizada em todos os sensores de 1 mm é praticamente a mesma, com variações de aproximadamente 0,6 V/V para a faixa de índice de refração estudada. O melhor coeficiente de sensibilidade normalizada linear média foi de 9,21 para os sensores com fibra de 1 mm sem casca.

Em linhas gerais, o trabalho apresentado contribui para a comunidade científica, apresentando um refratômetro a fibra óptica, de fácil utilização e rápida aquisição de dados, com uma incerteza na medida de  $10^{-4}$  no índice de refração. Esta medida está acima das especificações necessárias para a indústria de alimentos, conforme referência apresentada na revisão bibliográfica [6], em que as incertezas na medida são da ordem de  $10^{-3}$ . Desta forma a implementação deste sensor atende também às necessidades industriais, sendo viável sua produção após os ajustes necessários.

Há uma contribuição significativa da análise estatística realizada para o sensor, por ter sido apresentada de maneira generalizada, permitindo através do seu estudo ser utilizada na análise de experimentos diversos.

# Capítulo 7

## Sugestões para trabalhos futuros

Apresentam-se abaixo algumas sugestões para trabalhos futuros:

1. Investigar teoricamente a variação da potência óptica na fibra curvada e com *taper* simultaneamente, em função da variação do índice de refração no meio externo.
2. Avaliar comparativamente a eficiência de um Amplificador *Lock-in* comercial e de um Amplificador *Lock-in* implementado no Simulink®.
3. Investigar o comportamento do sensor frente a variação de outros parâmetros, como absorção, associados a variação estudada do índice de refração.



# Capítulo 8

## Referências bibliográficas

- [1] WERNECK, M. M. *Transdutores e Interfaces*, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Ed. LTC, 1996.
- [2] GOUVEIA, C.A V. J. *Sensores em fibra óptica para monitorização ambiental*. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Comunicações e Redes. Departamento de matemática e engenharias Universidade de Madeiras, Portugal, 2008.
- [3] CALDAS P. S. M. *Sensores de Fluorescência em fibra óptica*. Dissertação de Mestrado em optoeletrônica e laser, Departamento de física. Faculdade de ciências da universidade do Porto. Coimbra, Portugal, 2003.
- [4] SOUZA, N.C. C., *Desenvolvimento de um imunossensor para detecção de Escherichia coli em água*. Tese de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Escola de Química/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2010.
- [5] BERES C., *Desenvolvimento de metodologia de detecção de microrganismos em água, baseada em biossensor de fibra óptica plástica*. Monografia apresentada para grau de Bacharel da Escola de Nutrição/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.
- [6] ZUBIA, J., GERMÁN, G., ARRÚE, j., “Passive device based on plastic optical fibers to determine the indices of refraction of liquids” *Applied Optics*, Vol. 39, n° 6, pp. 941-946, 2000.

- [7] PATERNO, A. S., SANCHES, V. S., GRAF J. C., FELIPE, A., TESTON S. A., “Automation and Characterization of a Fiber Optic Taper Rig System”, *XVIII Congresso Brasileiro de Automática*, pp. 2945-2949, Bonito, MS, Setembro de 2010.
- [8] LEUNG, A., SHANKAR, P. M., MUTHARASAN, R., “A review of fiber-optic biosensors”, *Sensors and Actuators B*, 125, pp. 688-703, 2007.
- [9] MUSA, B., ROZE, A. A., NOOR, A. S. M., ISMAIF, A. and MAHDI, M. A. “Effect of fiber profile parameters on the transmission properties of the tapered optical fibers”, *IEEE 2nd International Conference on Photonics (ICP)*, pp. 1-4, Malásia, outubro de 2011.
- [10] SRIVASTAVA, S. K. and GUPTA, B. D. “A Multitapered Fiber-Optic SPR Sensor With Enhanced Sensitivity”, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 23, N°. 13, pp. 923-925, July, 2011.
- [11] BAUDE, E. CAMPOS, D. P., “Comparative Study of Tapers in Optical Fibers Byfinite Difference – Beam Propagation Method (FD-BPM)”. *CILAMCE XXXII*, Ouro Preto, MG, novembro de 2011.
- [12] POPE, R. M. and FRY, E. S., “Absorption spectrum (380-700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements”, *Appl. Opt.*, 36, 8710-8723, 1997.
- [13] BERES, C., SOUZA, N. C. C., CARVALHO, C. C., NETO, J. S., SILVA M. H., WERNECK, M. M., “Development of a biosensor based in polymeric optical fiber to detect cells in water and fluids”, *The 18th International Conference on Plastic Optical Fibers*, v. 1, 15-17, Sydney, Austrália, setembro de 2009.
- [14] FERREIRA, A. P. *Bacteriosensor – Tecnologia de sensoriamento bacteriológico a fibra óptica*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação de Engenharia COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2000.

- [15] NAZARÉ, F. V. B., BERES, C., SOUZA, N.C.C., WERNECK, M. M., MIGUEL, M. A., “Geometric Aspects in a Novel Plastic Optical Fiber Biosensor System”, *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*”, Hangzhou, China, maio de 2011.
- [16] WERNECK, M. M., ALLIL R. C., RODRIGUES, D. M. C., MIGUEL, M. A., NAZARÉ, F. V. B., WANDERMUR, G.L., NETO, J. L. S., PAIS, J. S and RAMBAUSKE, D. C. “LPG and Taper Based Fiber-Optic Sensor for Index Ofrefraction Measurementsin Biosensor Applications”, *The 21th International Conference on Plastic Optical Fibers*, Atlanta, USA, setembro de 2012.
- [17] HECHT, E., *Theory and problems of Optics*, Ed. Mc Graw-Hill, 1975.
- [18] HECHT, E., *Optics*, 4rd ed, Ed. Addison Wesley, 2002.
- [19] SNYDER, W. A., LOVE J.D., *Optical Waveguide Theory*, New York, Ed. Chapman and Hall, 1983.
- [20] ZILIO, S. C., *Optica Moderna, Fundamentos e Aplicações*, Fotônica, IFSC-USP, 2010.
- [21] GRIFFITHS, D. J. *Introduction to electrodynamics*, 3rd ed, Upper Saddle River, New Jersey, Ed. Prentice Hall, 1999.
- [22] CULSHAW, B. and DAKIN, J. *Optical fiber sensors components and subsystems*. Vol. 3. Norwood, MA, USA,Ed. Artech House, 1996.
- [23] STEWART, G., CULSHAW, B., “Optical Waveguide Modelling and Design for Evanescent Field Chemical Sensors” *Optical and Quantum Electronics*, 26, pp. 249-259 1994.

- [24] CAMPOS, D. P. *Simulação numérica de “tapers” em fibras óticas para aplicações em sensores*. Laboratório de Física – Coordenação de eletrônica – COELE, Campus Pato Branco, Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR Artigo-SICITE, 2010.
- [25] SIEMENS, LED SFH485P datasheet. Disponível em <<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/45673/SIEMENS/SFH485P.html>>. Acesso em abril de 2012.
- [26] SIEMENS, Fotodiodo SFH203P datasheet. Disponível em <<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/45613/SIEMENS/SFH203P.html>>. Acesso em abril de 2012.
- [27] ESKA, Specification Sheet CK – 40 Plastic Optical Fiber. <[http://i-fiberoptics.com/pdf/ck40\\_e.pdf](http://i-fiberoptics.com/pdf/ck40_e.pdf)>. Acesso em abril de 2012.
- [28] UNIVERSITY OF WASHINGTON POLYMER OPTICS LAB. Disponível em <<http://depts.washington.edu/polylab/home.html>>. Coordenado por Dr. Ann Mescher. Fibra fabricada em abril de 2012.
- [29] SOLITZ EUROPE PLC, Plastic Optical Fiber DB-480 (fiber without cladding). Disponível em <<http://www.sojitz.com>>. Fibra fabricada em setembro de 2011.
- [30] QUIMIS, Microscópio Digital - DMBA 210/310 Motic - Q711BD. Disponível em <<http://www.quimis.com.br/produtos.php?prod=272>>. Acesso em abril de 2012.
- [31] ADVANTECH, PCI-1711 datasheet. Disponível em <<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/327126/ADVANTECH/PCI-1711.html>>. Acessado em abril de 2012.

- [32] RESENDE, L. C., *Desenvolvimento de um Amplificador Lock-In com DSP operando em Altas Frequências*. Tese de Mestrado em Instrumentação Científica, Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas/CBPF, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.
- [33] *Avaliação de dados de medição - Guia para a Expressão da Incerteza de Medição*. ISO GUM 2008. Primeira Edição Brasileira do Évaluation des données de mesure - Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure INMETRO. JCGM. Setembro de 2008.
- [34] COUTO, P.R.G., *Estimativa da incerteza da massa específica da gasolina pelo iso gum 95 e método de monte carlo e seu impacto na transferência de custódia*. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Escola de Química/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2006.
- [35] HELMER H., *Equações do Segundo Grau: Métodos de Resolução e Análise em Livros Didáticos Antes e Durante o Movimento da Matemática Moderna*. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-graduação em Educação, Faculdade de Educação/UFES, Espírito Santo, Brasil, 2006.
- [36] MASSART, D.L.; VANDEGINSTE, B. M. G.; BUYDENS, L. M. C.; JONG, S.; LEWI, P. J. and SMEYERS-VERBEKE, J. *Handbook of Chemometrics and Qualimetrics*. Part A. Volume 20A. Elsevier Science B.V. 1997.867p.

# Anexo A

## Resultados dos experimentos com sensores

### A.1 Tensões medidas pelos sensores de fibra de 1 mm com casca e com *taper*

Tabela A.1: Tensões medidas pelo sensor 1 de fibra de 1 mm com casca e com *taper*.

Ensaio #	Índice de Refração de Referência					
	1,334	1,3552	1,3676	1,3733	1,3880	1,3937
	Tensão de Saída (V)					
Ensaio 1	3,1176	2,4398	2,1638	2,0242	1,6821	1,5524
Ensaio 2	3,2090	2,4909	2,1558	2,0098	1,6574	1,5383
Ensaio 3	3,1091	2,4669	2,1310	2,0128	1,6633	1,5248
Ensaio 4	3,1996	2,4826	2,1476	2,0077	1,6624	1,5249
Ensaio 5	3,1760	2,4811	2,1509	2,0148	1,6572	1,5232
Ensaio 6	3,1831	2,4868	2,1356	2,0021	1,6496	1,5174
Ensaio 7	3,1503	2,4626	2,1179	1,9908	1,6331	1,5154
Ensaio 8	3,1332	2,4491	2,1232	1,9779	1,6409	1,5153
Ensaio 9	3,1303	2,4552	2,1095	1,9851	1,6502	1,5173
Ensaio 10	3,1312	2,4640	2,1232	1,9903	1,6514	1,5214

Tabela A.2: Tensões medidas pelo sensor 2 de fibra de 1 mm com casca e com *taper*.

Ensaio #	Índice de Refração de Referência					
	1,334	1,3552	1,3676	1,3733	1,3880	1,3937
	Tensão de Saída (V)					
Ensaio 1	3,1462	2,5233	2,1897	2,0152	1,5895	1,4576
Ensaio 2	3,2571	2,5622	2,1119	1,9522	1,6694	1,5225
Ensaio 3	3,1711	2,5052	2,1631	2,0089	1,6394	1,5163
Ensaio 4	3,0856	2,4763	2,1787	2,0984	1,6496	1,4807
Ensaio 5	3,0686	2,4224	2,0912	1,9567	1,6189	1,4793
Ensaio 6	3,0577	2,4142	2,0903	2,0068	1,6486	1,5116
Ensaio 7	3,2727	2,6039	2,2428	2,0993	1,7208	1,5897
Ensaio 8	3,2553	2,5739	2,2239	2,0676	1,6945	1,5091
Ensaio 9	3,0941	2,6220	2,2633	2,1068	1,7321	1,6016
Ensaio 10	3,2642	2,5833	2,2355	2,0774	1,7059	1,5703

Tabela A.3: Tensões medidas pelo sensor 3 de fibra de 1 mm com casca e com *taper*.

Ensaio #	Índice de Refração de Referência					
	1,334	1,3552	1,3676	1,3733	1,3880	1,3937
	Tensão de Saída (V)					
Ensaio 1	3,0411	2,3879	2,0759	1,9296	1,5823	1,4604
Ensaio 2	3,0987	2,4139	2,0888	1,9613	1,6073	1,4786
Ensaio 3	3,0401	2,3749	2,0520	1,9123	1,5814	1,4554
Ensaio 4	3,0356	2,3787	2,0519	1,9066	1,5645	1,4108
Ensaio 5	2,9331	2,2937	1,9834	1,8511	1,5196	1,3968
Ensaio 6	2,8482	2,1479	1,9396	1,8069	1,4678	1,3715
Ensaio 7	2,7294	2,1889	1,8865	1,7709	1,4664	1,3768
Ensaio 8	2,8148	2,2284	1,9309	1,8136	1,5071	1,3756
Ensaio 9	2,8306	2,2360	1,9337	1,8135	1,5053	1,4127
Ensaio 10	2,8077	2,2464	1,9355	1,8088	1,4885	1,3942

Tabela A.4: Tensões medidas pelo sensor 4 de fibra de 1 mm com casca e com *taper*.

Ensaio #	Índice de Refração de Referência					
	1,334	1,3552	1,3676	1,3733	1,3880	1,3937
	Tensão de Saída (V)					
Ensaio 1	2,6435	2,0517	1,7071	1,5825	1,2403	1,1106
Ensaio 2	2,6474	2,0698	1,7168	1,5900	1,2394	1,1116
Ensaio 3	2,6530	2,0696	1,7239	1,6120	1,2605	1,1334
Ensaio 4	2,7322	2,1286	1,7652	1,6340	1,2713	1,1402
Ensaio 5	2,7100	2,1036	1,7691	1,6371	1,2776	1,1028
Ensaio 6	2,6593	2,0622	1,7129	1,5866	1,2428	1,1052
Ensaio 7	2,6540	2,0668	1,7925	1,6617	1,2861	1,1521
Ensaio 8	2,6608	2,0742	1,7413	1,5899	1,2912	1,1466
Ensaio 9	2,7381	2,1331	1,7538	1,6212	1,2642	1,1424
Ensaio 10	2,7110	2,1269	1,7436	1,5893	1,2223	1,0958

Tabela A.5: Tensões medidas pelo sensor 5 de fibra de 1 mm com casca e com *taper*.

Ensaio #	Índice de Refração de Referência					
	1,334	1,3552	1,3676	1,3733	1,3880	1,3937
	Tensão de Saída (V)					
Ensaio 1	2,5641	2,0349	1,7597	1,6083	1,2992	1,1859
Ensaio 2	2,5517	1,9954	1,7493	1,5989	1,3034	1,2001
Ensaio 3	2,5532	2,0550	1,7725	1,6562	1,3098	1,1894
Ensaio 4	2,5715	2,0436	1,7612	1,6394	1,2959	1,1939
Ensaio 5	2,5819	2,0213	1,7728	1,6165	1,3067	1,1907
Ensaio 6	2,5822	2,0460	1,7766	1,6342	1,3036	1,1863
Ensaio 7	2,5615	2,0368	1,7676	1,6517	1,3176	1,2060
Ensaio 8	2,5384	2,0273	1,7509	1,6365	1,3087	1,1478
Ensaio 9	2,5290	2,0453	1,7519	1,6264	1,3018	1,2168
Ensaio 10	2,5267	2,0209	1,7456	1,6086	1,2845	1,1786

## A.2 Tensões medidas pelos sensores de fibra de 1 mm sem casca

Tabela A.6: Tensões medidas pelo sensor 1 de fibra de 1 mm sem casca.

Ensaio #	Índice de Refração de Referência					
	1,334	1,3552	1,3676	1,3733	1,3880	1,3937
	Tensão de Saída (V)					
Ensaio 1	2,7239	2,1489	1,8581	1,7251	1,3768	1,2552
Ensaio 2	2,7549	2,1632	1,8755	1,7386	1,3783	1,2522
Ensaio 3	2,7412	2,1584	1,8766	1,7239	1,3825	1,2594
Ensaio 4	2,7459	2,1604	1,8670	1,7220	1,3793	1,2744
Ensaio 5	2,7503	2,1575	1,8731	1,7137	1,3892	1,2483
Ensaio 6	2,7499	2,1724	1,8648	1,7174	1,3949	1,2481
Ensaio 7	2,7316	2,1508	1,8570	1,7148	1,3799	1,2405
Ensaio 8	2,7317	2,1453	1,8480	1,7079	1,3675	1,2355
Ensaio 9	2,7218	2,1323	1,8376	1,6938	1,3642	1,2312
Ensaio 10	2,7030	2,1260	1,8468	1,6906	1,3587	1,2354



Tabela A.7: Tensões medidas pelo sensor 2 de fibra de 1 mm sem casca.

Ensaio #	Índice de Refração de Referência					
	1,334	1,3552	1,3676	1,3733	1,3880	1,3937
	Tensão de Saída (V)					
Ensaio 1	2,4403	1,8645	1,6128	1,4903	1,2397	1,1418
Ensaio 2	2,3674	1,8238	1,5794	1,4594	1,2019	1,0949
Ensaio 3	2,3263	1,8027	1,5794	1,3366	1,1067	1,0047
Ensaio 4	2,0988	1,6839	1,4743	1,3730	1,1348	1,0426
Ensaio 5	2,1670	1,6924	1,4615	1,3640	1,1164	1,0254
Ensaio 6	2,1335	1,6229	1,4094	1,2681	1,0308	0,9544
Ensaio 7	2,2177	1,7038	1,4888	1,3851	1,1335	1,0311
Ensaio 8	2,1952	1,6834	1,4688	1,3675	1,1145	1,0231
Ensaio 9	2,1520	1,6623	1,4359	1,3404	1,0909	0,9708
Ensaio 10	2,1165	1,6813	1,3835	1,3423	1,0782	0,9651

Tabela A.8: Tensões medidas pelo sensor 3 de fibra de 1 mm sem casca.

Ensaio #	Índice de Refração de Referência					
	1,334	1,3552	1,3676	1,3733	1,3880	1,3937
	Tensão de Saída (V)					
Ensaio 1	1,9378	1,4425	1,2460	1,1515	0,9101	0,7722
Ensaio 2	1,8807	1,4567	1,2321	1,0208	0,8799	0,7773
Ensaio 3	1,9382	1,4689	1,2404	1,1408	0,8997	0,7696
Ensaio 4	1,9291	1,4508	1,2335	1,1264	0,8907	0,7732
Ensaio 5	1,9054	1,4515	1,2505	1,1301	0,8905	0,7689
Ensaio 6	1,8950	1,4470	1,2236	1,1195	0,8845	0,7649
Ensaio 7	1,8999	1,4487	1,2249	1,1443	0,8787	0,7627
Ensaio 8	1,8764	1,4379	1,2112	1,1179	0,8778	0,7822
Ensaio 9	1,8523	1,4242	1,2025	1,0977	0,8694	0,7539
Ensaio 10	1,8753	1,4252	1,2009	1,0998	0,8749	0,7399

Tabela A.9: Tensões medidas pelo sensor 4 de fibra de 1 mm sem casca.

Ensaio #	Índice de Refração de Referência					
	1,334	1,3552	1,3676	1,3733	1,3880	1,3937
	Tensão de Saída (V)					
<b>Ensaio 1</b>	2,1499	1,6993	1,4718	1,3565	1,1032	0,9980
<b>Ensaio 2</b>	2,0556	1,6434	1,4075	1,3093	1,0556	0,9544
<b>Ensaio 3</b>	2,0059	1,6049	1,4067	1,3032	1,0490	0,9773
<b>Ensaio 4</b>	1,9818	1,5944	1,3969	1,3015	1,0574	0,9450
<b>Ensaio 5</b>	1,9817	1,5880	1,3846	1,2817	1,0356	0,9501
<b>Ensaio 6</b>	1,9584	1,5763	1,3770	1,2756	1,0315	0,9375
<b>Ensaio 7</b>	2,0000	1,5664	1,3594	1,2629	1,0218	0,9369
<b>Ensaio 8</b>	1,9407	1,5584	1,3690	1,2700	1,0162	0,9325
<b>Ensaio 9</b>	1,9571	1,5591	1,3620	1,2616	1,0274	0,9342
<b>Ensaio 10</b>	1,9227	1,5402	1,2404	1,1630	0,9607	0,8658

Tabela A.10: Tensões medidas pelo sensor 5 de fibra de 1 mm sem casca.

Ensaio #	Índice de Refração de Referência					
	1,334	1,3552	1,3676	1,3733	1,3880	1,3937
	Tensão de Saída (V)					
<b>Ensaio 1</b>	2,0099	1,5420	1,3193	1,2117	0,9548	0,8532
<b>Ensaio 2</b>	2,0339	1,5463	1,3036	1,2037	0,9511	0,8505
<b>Ensaio 3</b>	2,0147	1,5355	1,3015	1,1989	0,9340	0,8378
<b>Ensaio 4</b>	1,9893	1,5308	1,2845	1,1932	0,9288	0,8388
<b>Ensaio 5</b>	1,9869	1,5219	1,2861	1,1939	0,9230	0,8286
<b>Ensaio 6</b>	1,9757	1,5112	1,2683	1,1746	0,9200	0,8220
<b>Ensaio 7</b>	1,9685	1,5062	1,2651	1,1744	0,9257	0,8276
<b>Ensaio 8</b>	1,8954	1,4698	1,2526	1,1525	0,9321	0,8131
<b>Ensaio 9</b>	1,9240	1,4703	1,2000	1,1120	0,9001	0,7740
<b>Ensaio 10</b>	1,8569	1,4093	1,1802	1,0946	0,8884	0,7753

### A.3 Tensões medidas pelos sensores de fibra de 1 mm com casca e sem taper

Tabela A.11: Tensões medidas pelo sensor 1 de fibra de 1 mm com casca sem taper.

Ensaio #	Índice de Refração de Referência					
	1,334	1,3552	1,3676	1,3733	1,3880	1,3937
	Tensão de Saída (V)					
<b>Ensaio 1</b>	1,6470	1,2961	1,1235	1,0248	0,7932	0,6977
<b>Ensaio 2</b>	1,6643	1,2925	1,1042	1,0119	0,7868	0,6899
<b>Ensaio 3</b>	1,6774	1,2932	1,1044	1,0009	0,7817	0,6838
<b>Ensaio 4</b>	1,6792	1,3015	1,1025	1,0028	0,7865	0,6864
<b>Ensaio 5</b>	1,6903	1,3012	1,1107	1,0114	0,7861	0,6868
<b>Ensaio 6</b>	1,6865	1,3094	1,1110	1,0118	0,7839	0,6835
<b>Ensaio 7</b>	1,6863	1,3064	1,1121	1,0119	0,7839	0,6858
<b>Ensaio 8</b>	1,6825	1,3116	1,1114	1,0098	0,7814	0,6807
<b>Ensaio 9</b>	1,6936	1,3149	1,1106	1,0111	0,7822	0,6820
<b>Ensaio 10</b>	1,6921	1,3158	1,1099	1,0082	0,7837	0,6821

Tabela A.12: Tensões medidas pelo sensor 2 de fibra de 1 mm com casca sem taper.

Ensaio #	Índice de Refração de Referência					
	1,334	1,3552	1,3676	1,3733	1,3880	1,3937
	Tensão de Saída (V)					
<b>Ensaio 1</b>	1,9481	1,5448	1,3438	1,2416	1,0026	0,8983
<b>Ensaio 2</b>	1,9348	1,5422	1,3386	1,2362	0,9940	0,8859
<b>Ensaio 3</b>	1,9472	1,5464	1,3384	1,2426	0,9938	0,8864
<b>Ensaio 4</b>	1,9448	1,5442	1,3372	1,2324	0,9895	0,8830
<b>Ensaio 5</b>	1,9411	1,5400	1,3334	1,2289	0,9910	0,8826
<b>Ensaio 6</b>	1,9330	1,5367	1,3305	1,2277	0,9759	0,8701
<b>Ensaio 7</b>	1,9039	1,5155	1,3135	1,2128	0,9738	0,8716
<b>Ensaio 8</b>	1,9111	1,5145	1,3023	1,1979	0,9715	0,8612
<b>Ensaio 9</b>	1,9148	1,5192	1,3139	1,2127	0,9766	0,8675
<b>Ensaio 10</b>	1,9134	1,5190	1,3147	1,2089	0,9701	0,8587

Tabela A.13: Tensões medidas pelo sensor 3 de fibra de 1 mm com casca sem taper.

Ensaio #	Índice de Refração de Referência					
	1,334	1,3552	1,3676	1,3733	1,3880	1,3937
	Tensão de Saída (V)					
Ensaio 1	1,3119	1,0601	0,9312	0,8675	0,7184	0,6491
Ensaio 2	1,3131	1,0627	0,9298	0,8643	0,7163	0,6484
Ensaio 3	1,3158	1,0622	0,9301	0,8686	0,7171	0,6526
Ensaio 4	1,3229	1,0686	0,9351	0,8677	0,7161	0,6497
Ensaio 5	1,3214	1,0686	0,9386	0,8693	0,7206	0,6519
Ensaio 6	1,3249	1,0700	0,9354	0,8691	0,7172	0,6492
Ensaio 7	1,3213	1,0671	0,9334	0,8664	0,7112	0,6462
Ensaio 8	1,3148	1,0619	0,9282	0,8632	0,7143	0,6492
Ensaio 9	1,3136	1,0607	0,9291	0,8627	0,7118	0,6462
Ensaio 10	1,3154	1,0607	0,9282	0,8622	0,7131	0,6466

Tabela A.14: Tensões medidas pelo sensor 4 de fibra de 1 mm com casca sem taper.

Ensaio #	Índice de Refração de Referência					
	1,334	1,3552	1,3676	1,3733	1,3880	1,3937
	Tensão de Saída (V)					
Ensaio 1	1,0459	0,8544	0,7074	0,7007	0,5857	0,5324
Ensaio 2	1,0246	0,8506	0,7557	0,7047	0,5872	0,5342
Ensaio 3	1,0202	0,8473	0,7490	0,6989	0,5829	0,5323
Ensaio 4	1,0265	0,8474	0,7510	0,6984	0,5812	0,5318
Ensaio 5	1,0256	0,8378	0,7374	0,6874	0,5756	0,5210
Ensaio 6	1,0158	0,8360	0,7400	0,6898	0,5741	0,5193
Ensaio 7	1,0115	0,8321	0,7359	0,6843	0,5764	0,5211
Ensaio 8	1,0188	0,8383	0,7388	0,6921	0,6140	0,5594
Ensaio 9	1,0706	0,8924	0,7872	0,7317	0,6091	0,5569
Ensaio 10	1,0732	0,7993	0,7017	0,6535	0,5433	0,4924

Tabela A.15: Tensões medidas pelo sensor 5 de fibra de 1 mm com casca sem taper.

Ensaio #	Índice de Refração de Referência					
	1,334	1,3552	1,3676	1,3733	1,3880	1,3937
	Tensão de Saída (V)					
<b>Ensaio 1</b>	1,5027	1,1872	1,0358	0,9690	0,7894	0,7138
<b>Ensaio 2</b>	1,4712	1,1867	1,0375	0,9583	0,7935	0,7139
<b>Ensaio 3</b>	1,4793	1,1883	1,0417	0,9632	0,7873	0,7100
<b>Ensaio 4</b>	1,4794	1,1923	1,0395	0,9630	0,7896	0,7181
<b>Ensaio 5</b>	1,4750	1,1988	1,0429	0,9654	0,7859	0,7136
<b>Ensaio 6</b>	1,4853	1,1940	1,0364	0,9675	0,7932	0,7185
<b>Ensaio 7</b>	1,4798	1,1923	1,0395	0,9709	0,7984	0,7167
<b>Ensaio 8</b>	1,4739	1,1921	1,0455	0,9669	0,7890	0,7127
<b>Ensaio 9</b>	1,4802	1,1928	1,0399	0,9661	0,7991	0,7213
<b>Ensaio 10</b>	1,4810	1,2020	1,0452	0,9640	0,7863	0,7105

#### A.4 Tensões medidas pelos sensores de fibra de 0,45 mm sem casca

Tabela A.16: Tensões medidas pelo sensor 1 de fibra de 0,45 mm sem casca.

Ensaio #	Índice de Refração de Referência					
	1,334	1,3552	1,3676	1,3733	1,3880	1,3937
	Tensão de Saída (V)					
<b>Ensaio 1</b>	3,4724	3,3975	3,1453	3,0161	2,5958	2,3754
<b>Ensaio 2</b>	3,4502	3,4145	3,1830	3,0050	2,5259	2,3669
<b>Ensaio 3</b>	3,4754	3,3170	3,0898	2,9329	2,5035	2,3045
<b>Ensaio 4</b>	3,4736	3,3554	3,0861	2,8293	2,3332	2,1910
<b>Ensaio 5</b>	3,4568	3,2185	2,9811	2,8312	2,4020	2,2297
<b>Ensaio 6</b>	3,4688	3,2480	2,9715	2,8249	2,4059	2,2117
<b>Ensaio 7</b>	3,4576	3,2069	2,9734	2,8249	2,4092	2,2173
<b>Ensaio 8</b>	3,4658	3,2041	2,9614	2,8119	2,3775	2,2050
<b>Ensaio 9</b>	3,4572	3,2031	2,9603	2,8012	2,3585	2,1863
<b>Ensaio 10</b>	3,4527	3,1772	2,9347	2,8009	2,3591	2,1803

Tabela A.17: Tensões medidas pelo sensor 2 de fibra de 0,45 mm sem casca.

Ensaio #	Índice de Refração de Referência					
	1,334	1,3552	1,3676	1,3733	1,3880	1,3937
	Tensão de Saída (V)					
Ensaio 1	2,0773	1,5751	1,3306	1,2065	0,9171	0,7793
Ensaio 2	1,9759	1,5597	1,3351	1,2069	0,9138	0,7717
Ensaio 3	2,0219	1,6027	1,3527	1,2312	0,9342	0,7913
Ensaio 4	2,0163	1,5946	1,3449	1,2243	0,9316	0,7893
Ensaio 5	1,9204	1,5173	1,2809	1,1698	0,8856	0,7493
Ensaio 6	1,9257	1,5279	1,2933	1,1790	0,8976	0,7633
Ensaio 7	1,9282	1,5168	1,2876	1,1615	0,8876	0,7514
Ensaio 8	1,8868	1,4853	1,2509	1,1373	0,8461	0,6753
Ensaio 9	1,7836	1,4635	1,2484	1,1257	0,8597	0,7301
Ensaio 10	1,8216	1,4545	1,2379	1,1290	0,8633	0,7369

Tabela A.18: Tensões medidas pelo sensor 3 de fibra de 0,45 mm sem casca.

Ensaio #	Índice de Refração de Referência					
	1,334	1,3552	1,3676	1,3733	1,3880	1,3937
	Tensão de Saída (V)					
Ensaio 1	1,4719	1,1966	0,9633	0,9010	0,7147	0,6204
Ensaio 2	1,2973	1,0816	0,9548	0,8881	0,7107	0,6130
Ensaio 3	1,2823	1,0566	0,9372	0,8768	0,7076	0,6153
Ensaio 4	1,2612	1,0528	0,9343	0,8822	0,7015	0,6104
Ensaio 5	1,2678	1,0557	0,9341	0,8696	0,6990	0,6098
Ensaio 6	1,2580	1,0454	0,9293	0,8571	0,6911	0,6008
Ensaio 7	1,2377	1,0490	0,9183	0,8492	0,6922	0,6032
Ensaio 8	1,2453	1,0382	0,9122	0,8496	0,6876	0,5992
Ensaio 9	1,2293	1,0298	0,8487	0,8494	0,6838	0,5972
Ensaio 10	1,2248	1,0262	0,9071	0,8460	0,6821	0,5938

Tabela A.19: Tensões medidas pelo sensor 4 de fibra de 0,45 mm sem casca.

Ensaio #	Índice de Refração de Referência					
	1,334	1,3552	1,3676	1,3733	1,3880	1,3937
	Tensão de Saída (V)					
<b>Ensaio 1</b>	2,2845	1,8818	1,6291	1,5182	1,2164	1,0705
<b>Ensaio 2</b>	2,3071	1,8996	1,6420	1,5224	1,2161	1,0680
<b>Ensaio 3</b>	2,2684	1,8821	1,6330	1,5233	1,2125	1,0664
<b>Ensaio 4</b>	2,3007	1,8820	1,6330	1,5185	1,2187	1,0602
<b>Ensaio 5</b>	2,2561	1,8797	1,6299	1,4329	1,1602	1,0356
<b>Ensaio 6</b>	2,1989	1,8073	1,5585	1,4571	1,1715	1,0329
<b>Ensaio 7</b>	2,1118	1,7785	1,5517	1,4449	1,1631	1,0259
<b>Ensaio 8</b>	2,1366	1,7569	1,5316	1,4319	1,1474	1,0057
<b>Ensaio 9</b>	2,0879	1,7560	1,5204	1,4182	1,1281	1,0249
<b>Ensaio 10</b>	2,1426	1,7905	1,5493	1,4057	1,1654	1,0242

Tabela A.20: Tensões medidas pelo sensor 5 de fibra de 0,45 mm sem casca.

Ensaio #	Índice de Refração de Referência					
	1,334	1,3552	1,3676	1,3733	1,3880	1,3937
	Tensão de Saída (V)					
<b>Ensaio 1</b>	1,3829	1,0771	0,9714	0,9245	0,8017	0,7324
<b>Ensaio 2</b>	1,2252	1,0600	0,9782	0,9329	0,8073	0,7401
<b>Ensaio 3</b>	1,2679	1,0900	1,0016	0,9539	0,8265	0,7587
<b>Ensaio 4</b>	1,2738	1,0902	0,9818	0,9421	0,8054	0,7400
<b>Ensaio 5</b>	1,2586	1,0895	0,9869	0,9437	0,8059	0,7388
<b>Ensaio 6</b>	1,2634	1,1007	0,9981	0,9522	0,8134	0,7455
<b>Ensaio 7</b>	1,2773	1,1076	1,0055	0,9550	0,8190	0,7451
<b>Ensaio 8</b>	1,2911	1,1158	1,0174	0,9559	0,8131	0,7346
<b>Ensaio 9</b>	1,3250	1,1355	1,0550	0,9717	0,8296	0,7521
<b>Ensaio 10</b>	1,3160	1,1386	1,2010	0,9493	0,8023	0,7314

# Anexo B

## Gráficos

### B.1 Tensões em função do índice de refração dos sensores de fibra de 1 mm com casca e com *taper*

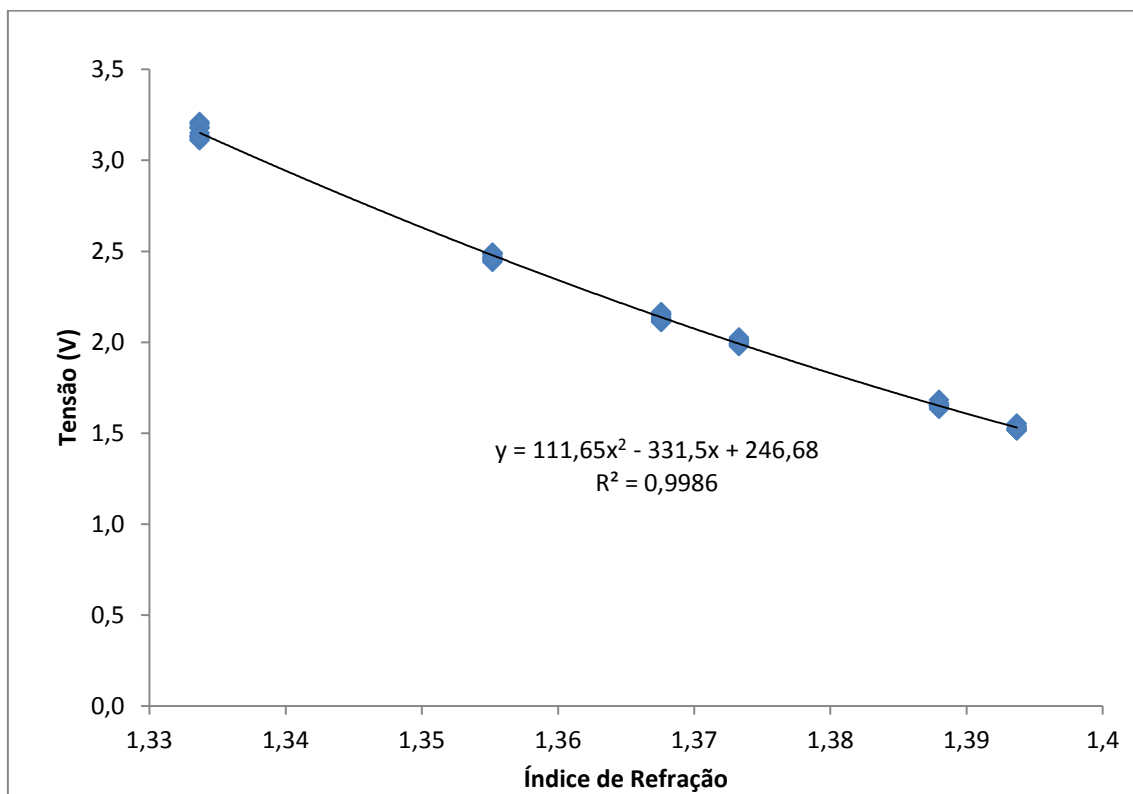


Figura B.1: Tensão em função do índice de refração do sensor 1 da fibra de 1 mm com casca e com *taper*.



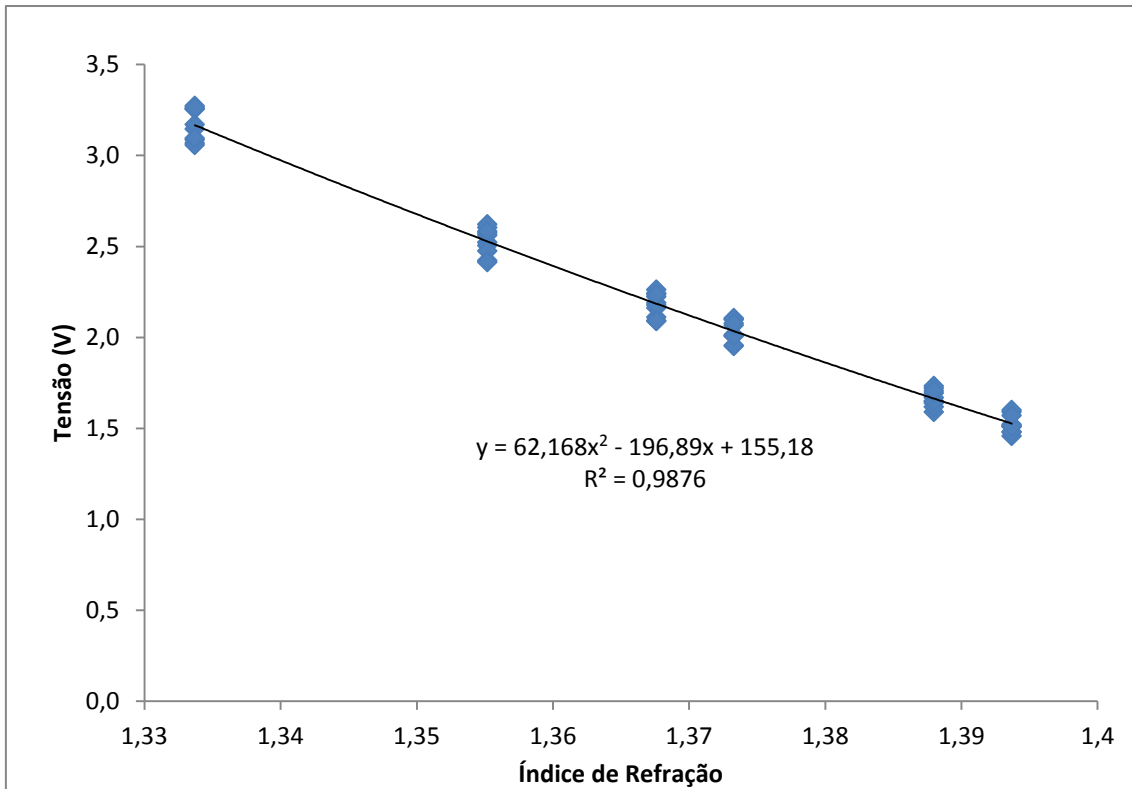


Figura B.2: Tensão em função do índice de refração do sensor 2 da fibra de 1 mm com casca e com taper.

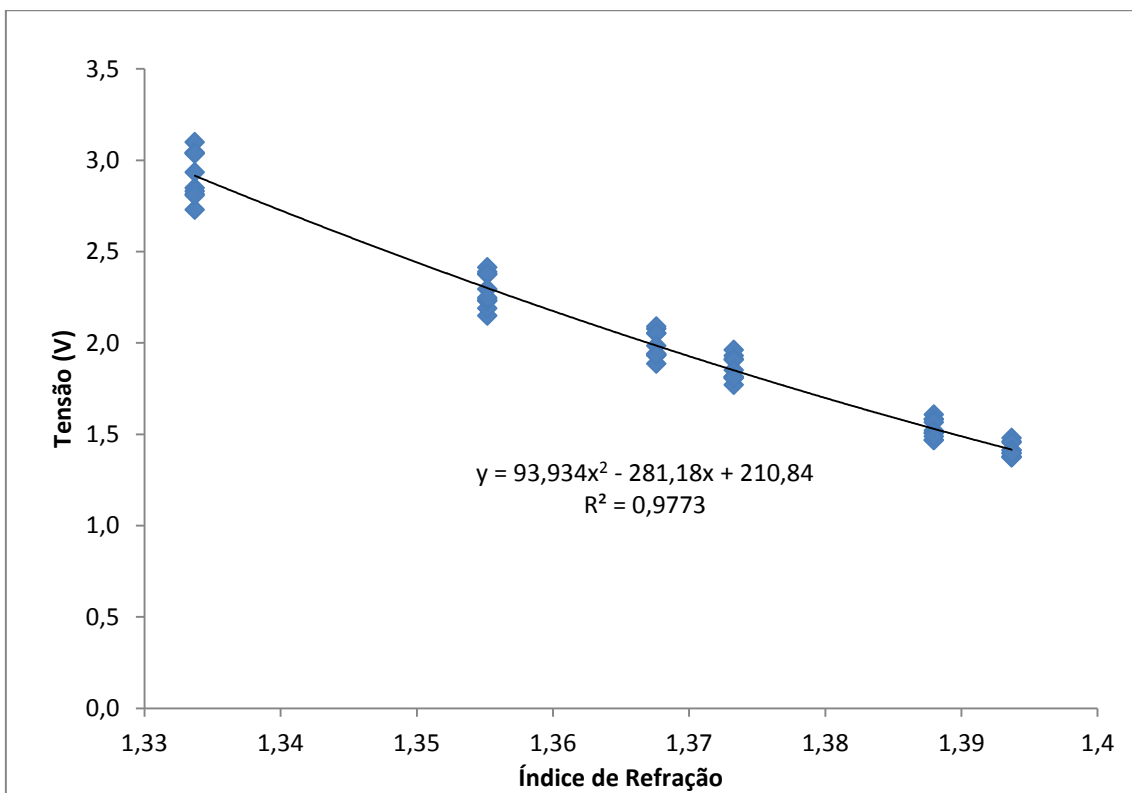


Figura B.3: Tensão em função do índice de refração do sensor 3 da fibra de 1 mm com casca e com taper.

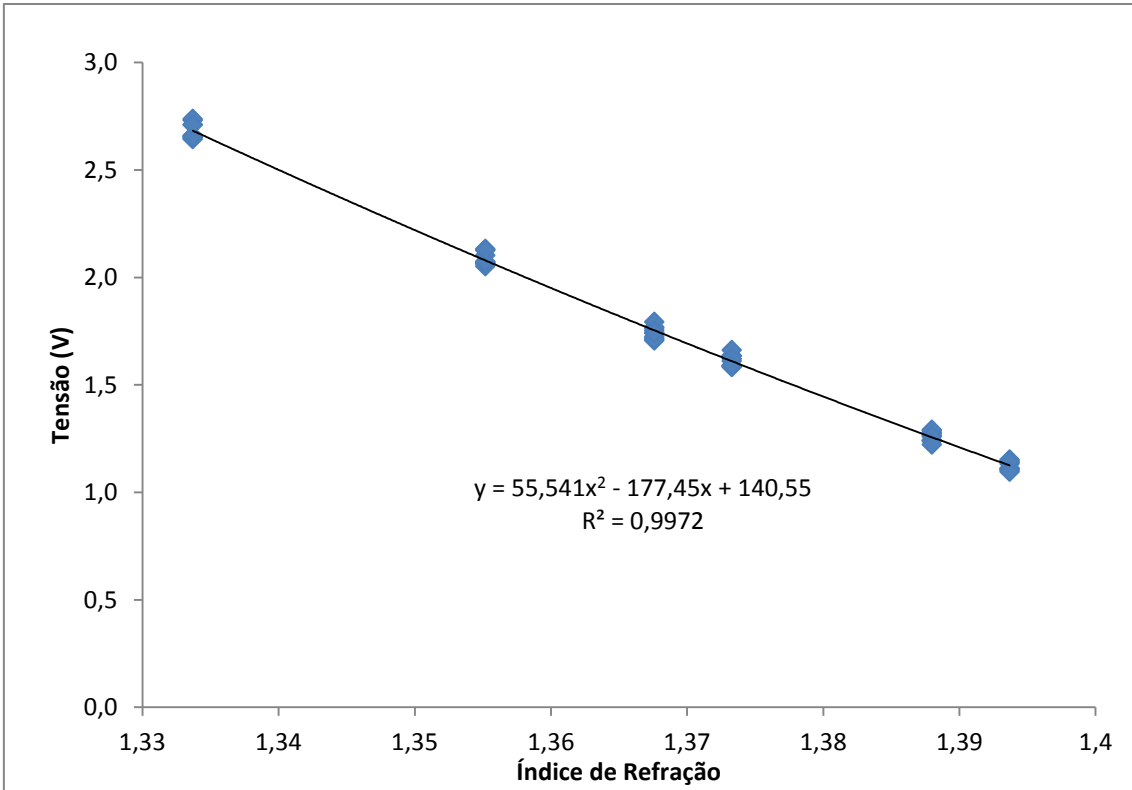


Figura B.4: Tensão em função do índice de refração do sensor 4 da fibra de 1 mm com casca e com taper.

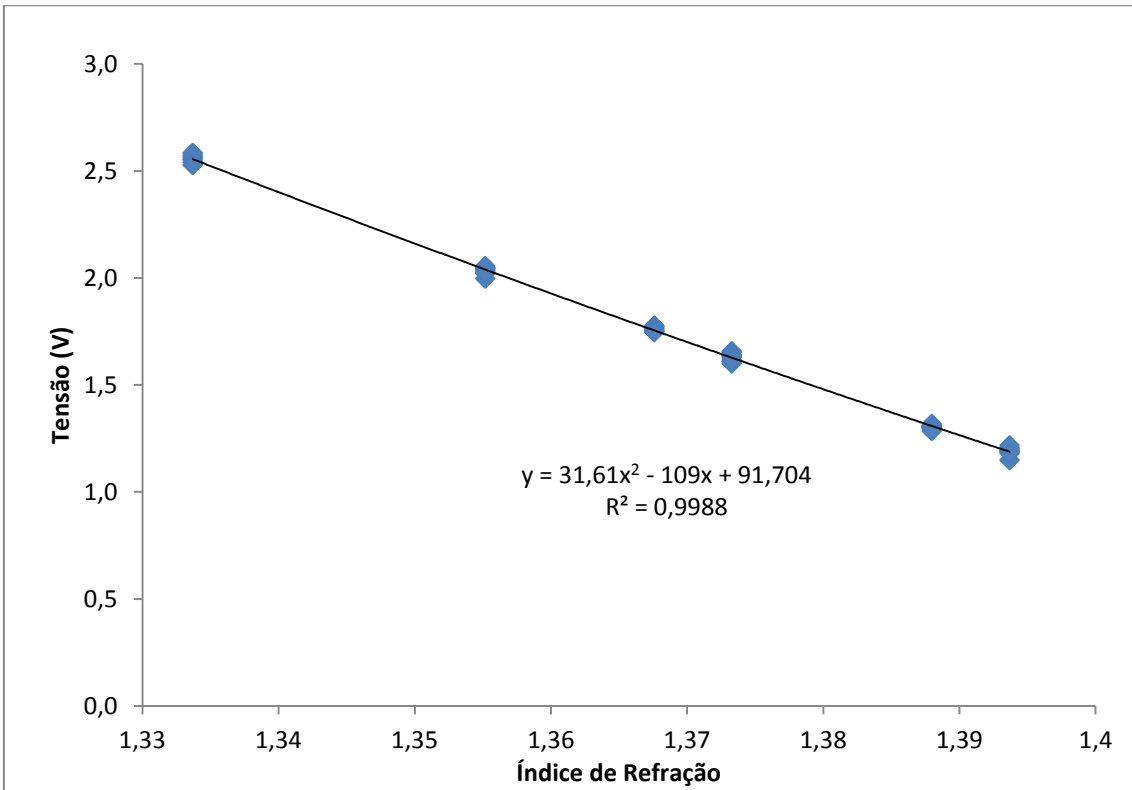


Figura B.5: Tensão em função do índice de refração do sensor 5 da fibra de 1 mm com casca e com taper.

## B.2 Tensões em função do índice de refração dos sensores de fibra de 1 mm sem casca

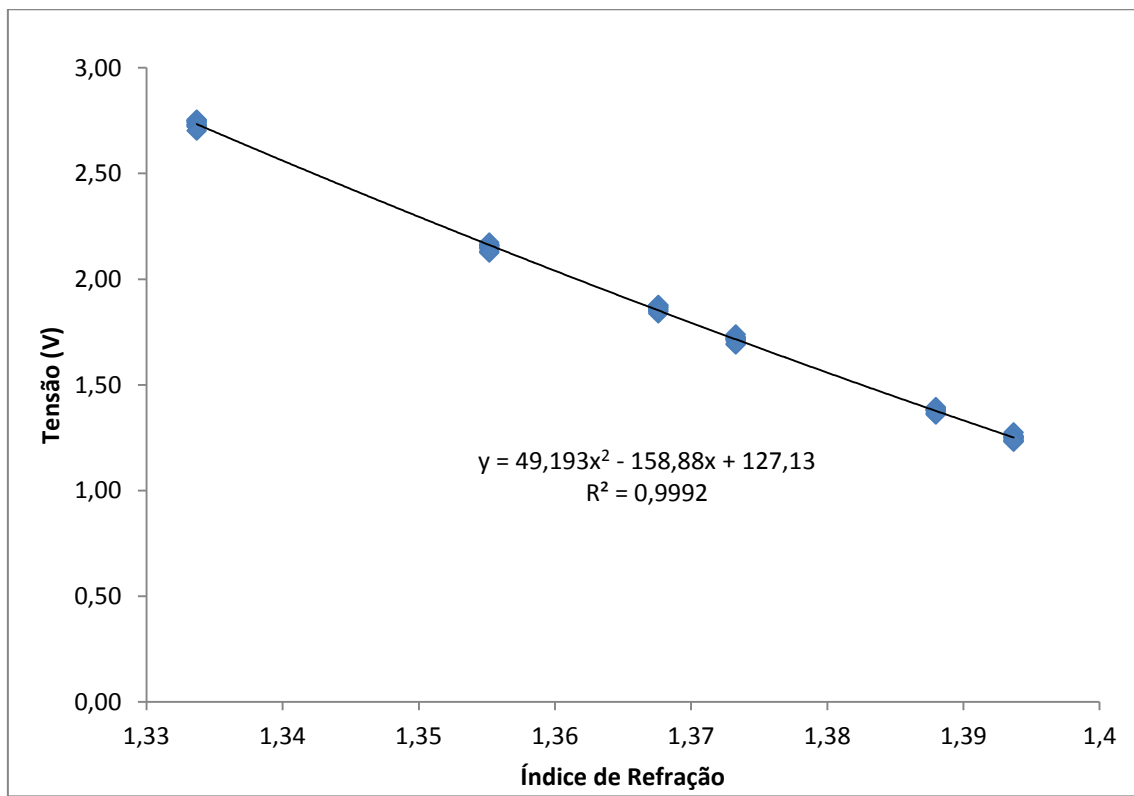


Figura B.6: Tensão em função do índice de refração do sensor 1 da fibra de 1 mm sem casca.

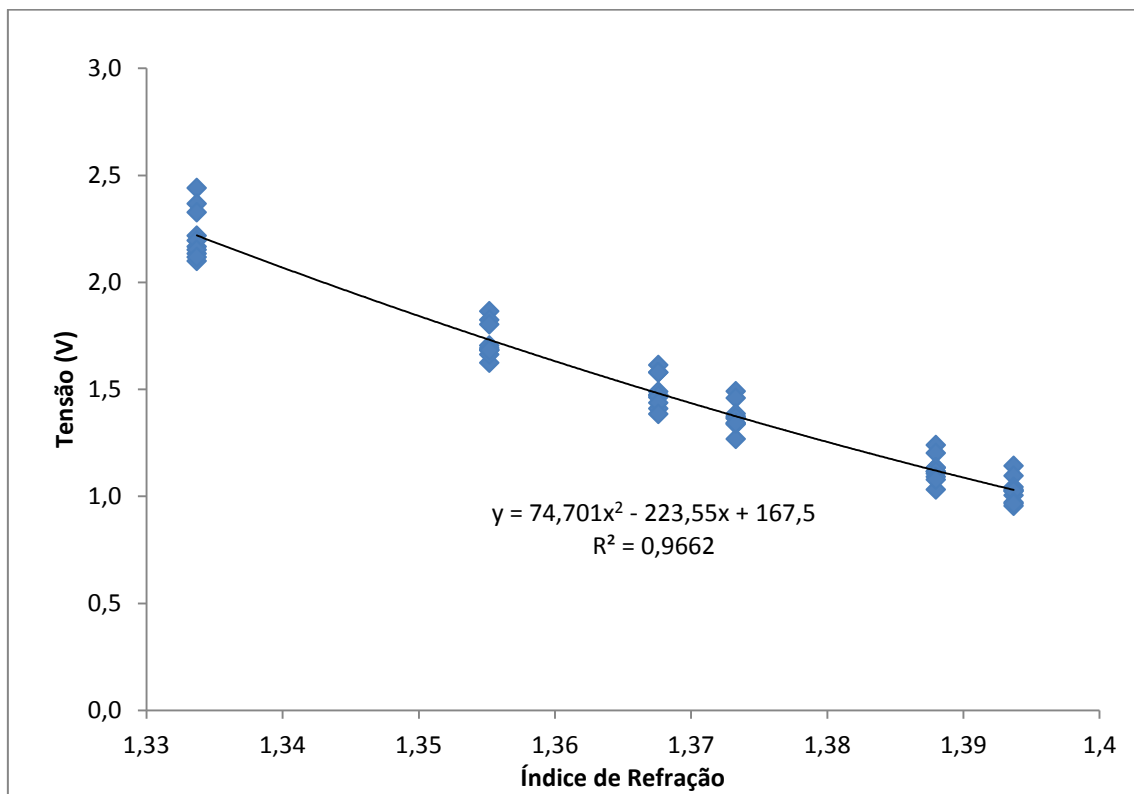


Figura B.7: Tensão em função do índice de refração do sensor 2 da fibra de 1 mm sem casca.

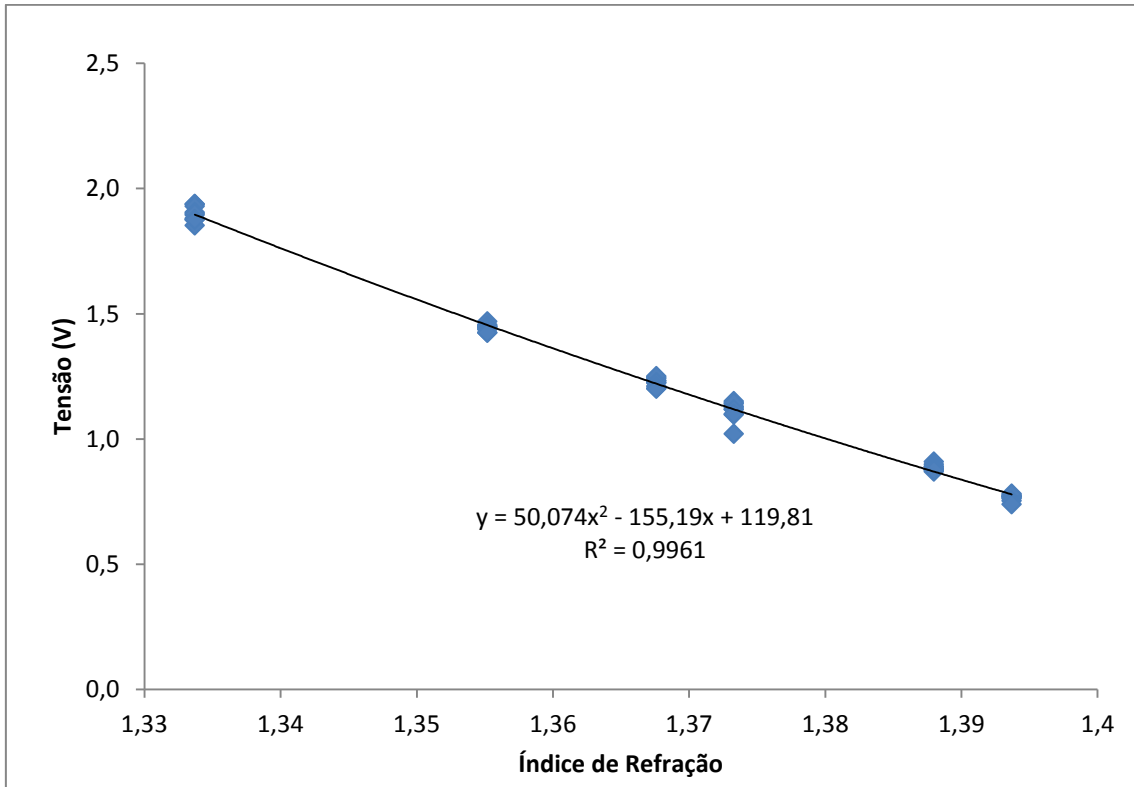


Figura B.8: Tensão em função do índice de refração do sensor 3 da fibra de 1 mm sem casca.

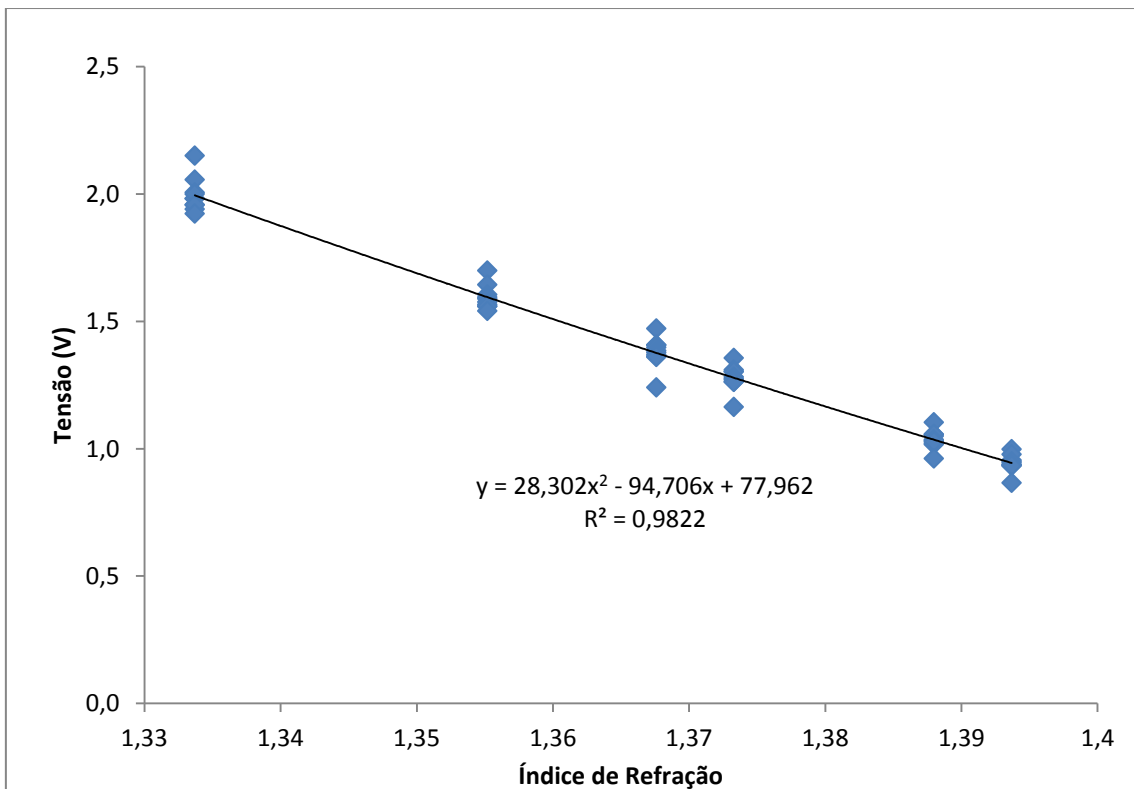


Figura B.9: Tensão em função do índice de refração do sensor 4 da fibra de 1 mm sem casca.

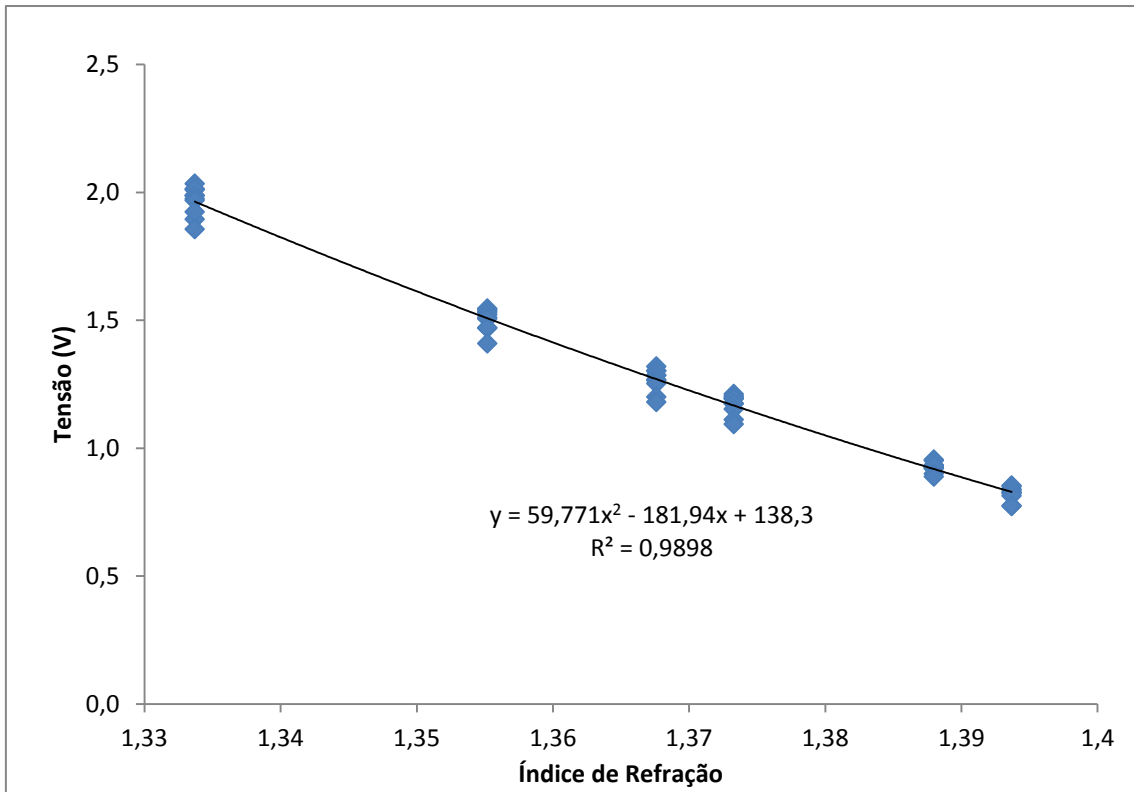


Figura B.10: Tensão em função do índice de refração do sensor 5 da fibra de 1 mm sem casca.

### B.3 Tensões em função do índice de refração dos sensores de fibra de 1 mm com casca sem taper.

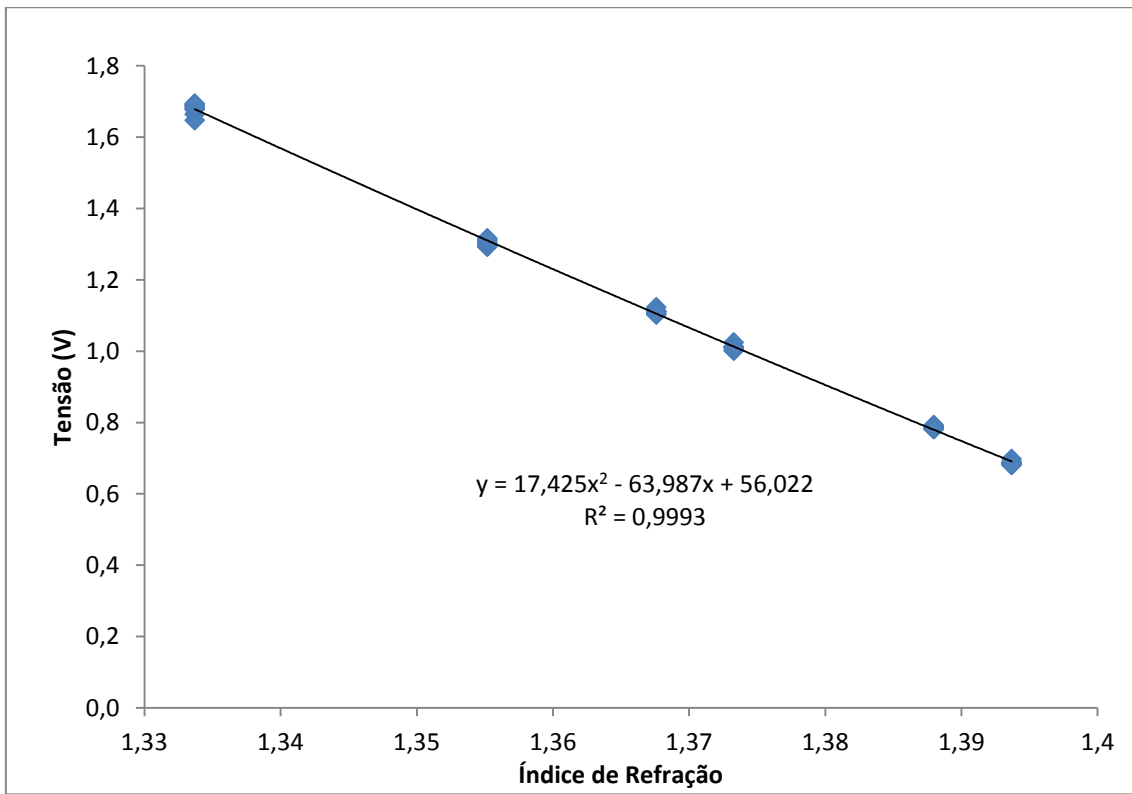


Figura B.11: Tensão em função do índice de refração do sensor 1 da fibra de 1 mm com casca sem taper.

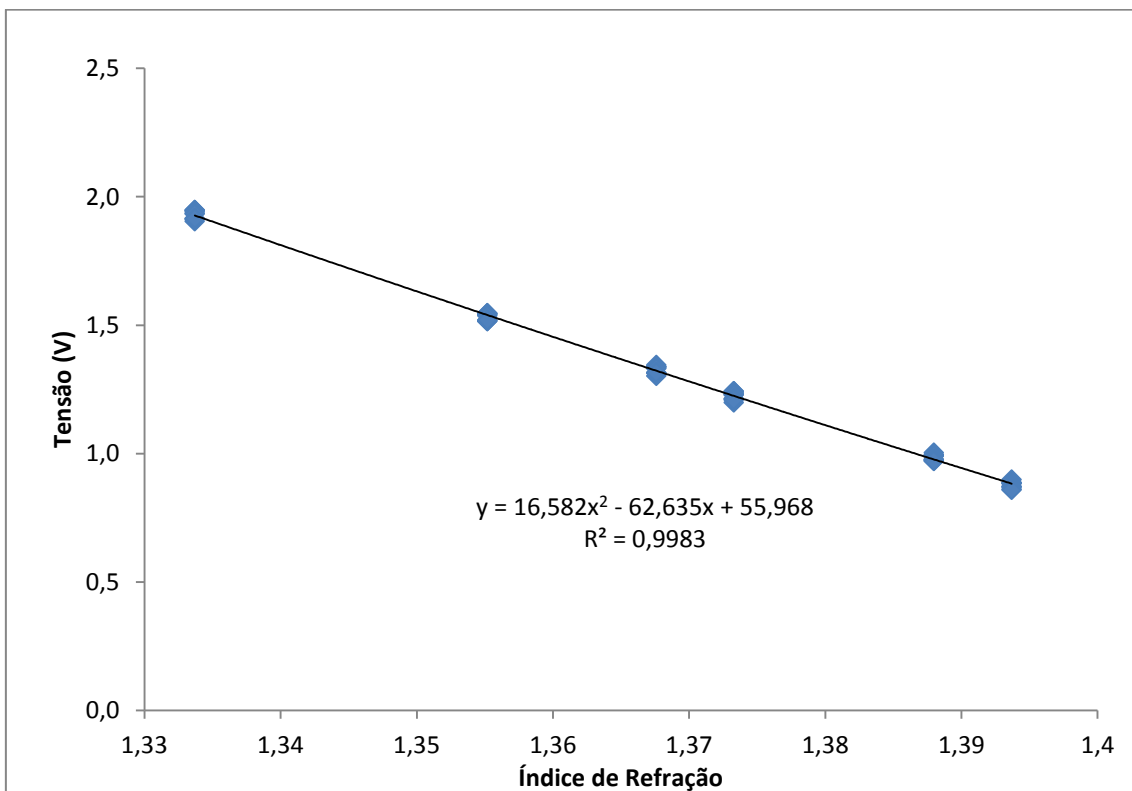


Figura B.12: Tensão em função do índice de refração do sensor 2 da fibra de 1 mm com casca sem taper.

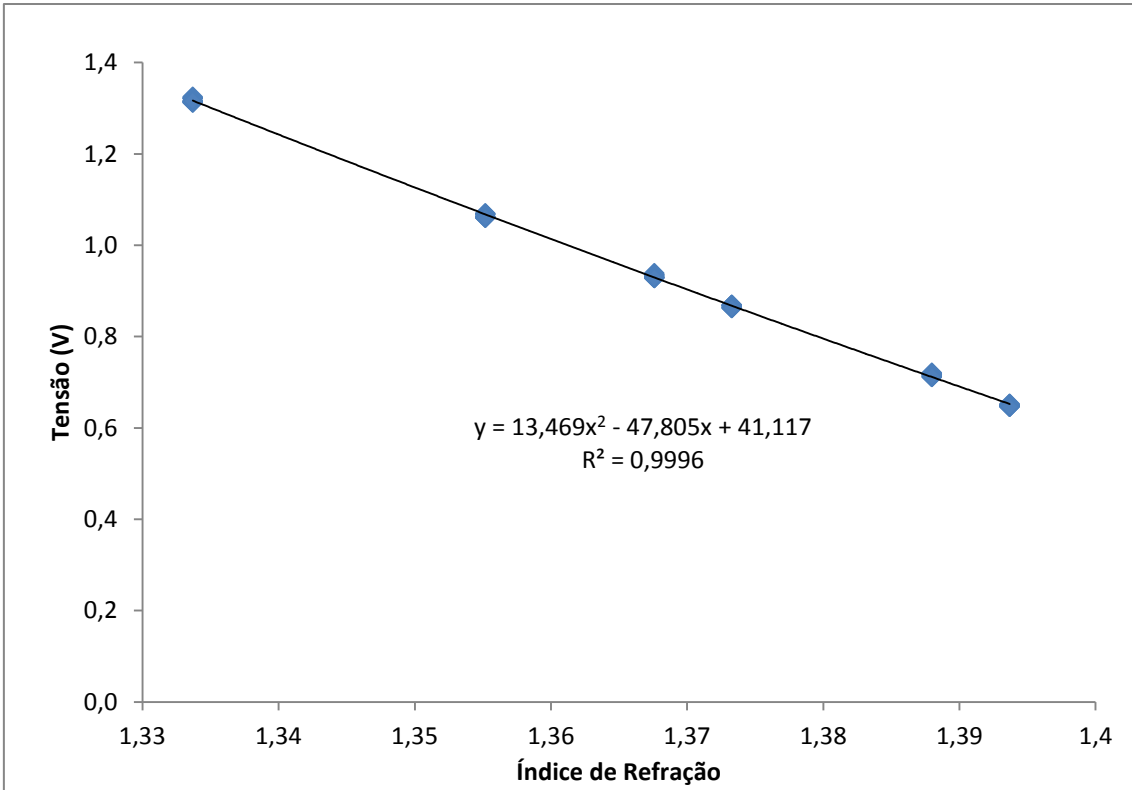


Figura B.13: Tensão em função do índice de refração do sensor 3 da fibra de 1 mm com casca sem taper.

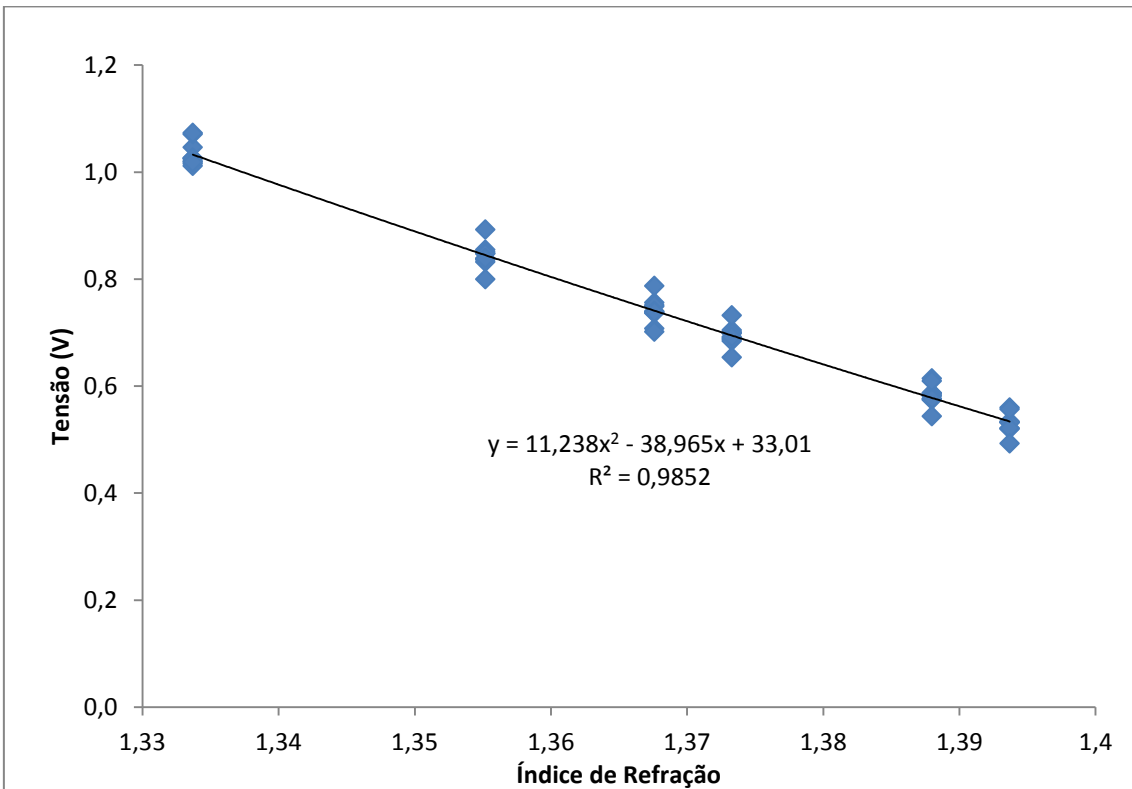


Figura B.14: Tensão em função do índice de refração do sensor 4 da fibra de 1 mm com casca sem taper.

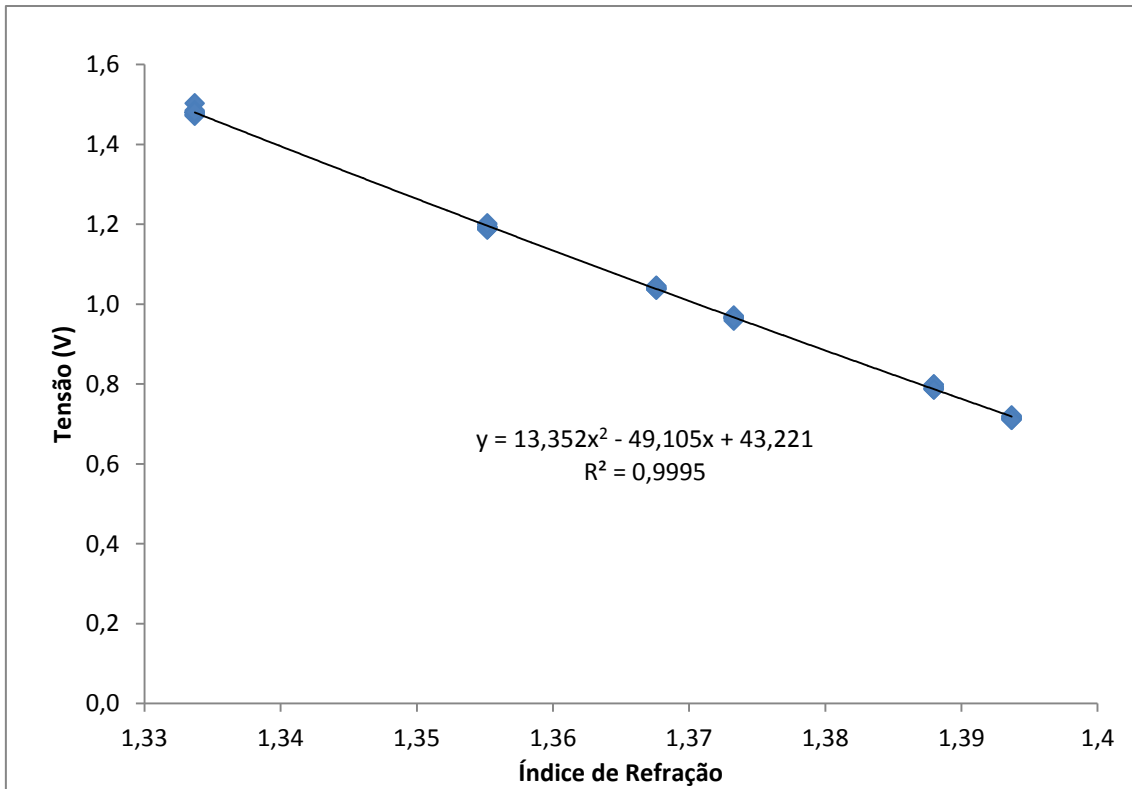


Figura B.15: Tensão em função do índice de refração do sensor 5 da fibra de 1 mm com casca sem *taper*.



### B.3 Tensões em função do índice de refração dos sensores de fibra de 0,45 mm sem casca.

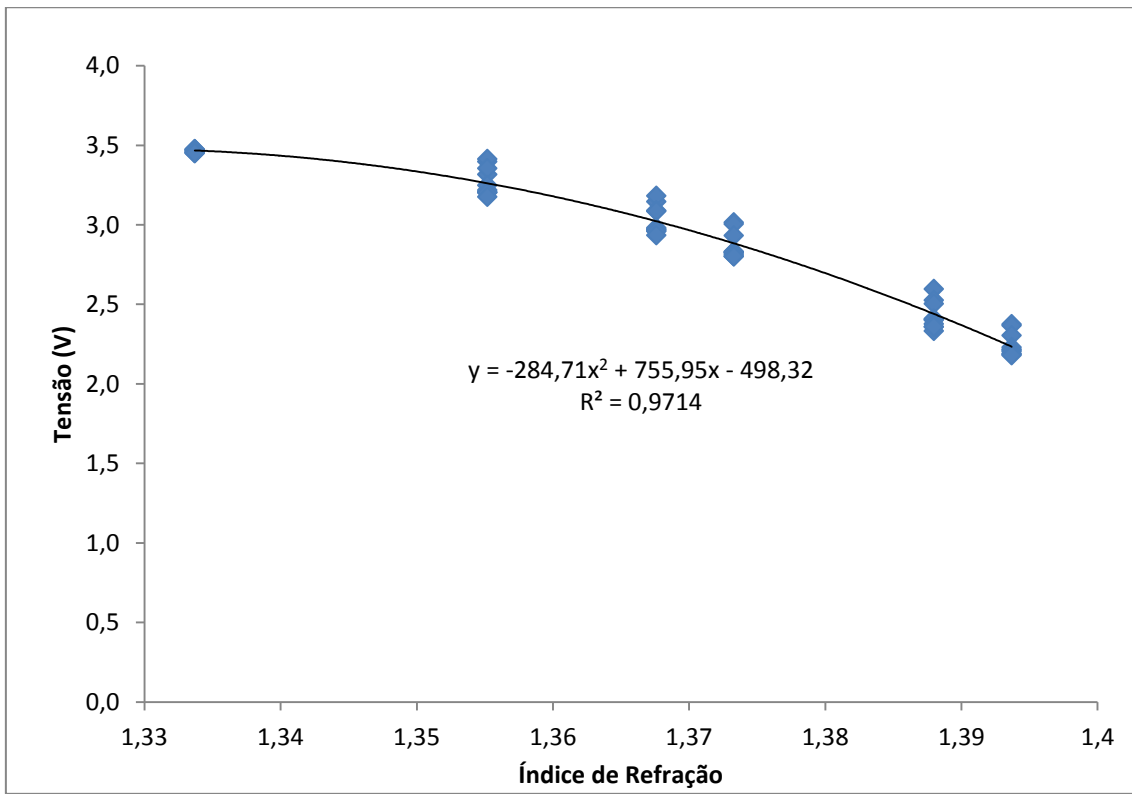


Figura B.16: Tensão em função do índice de refração do sensor 1 da fibra de 0,45 mm sem casca.

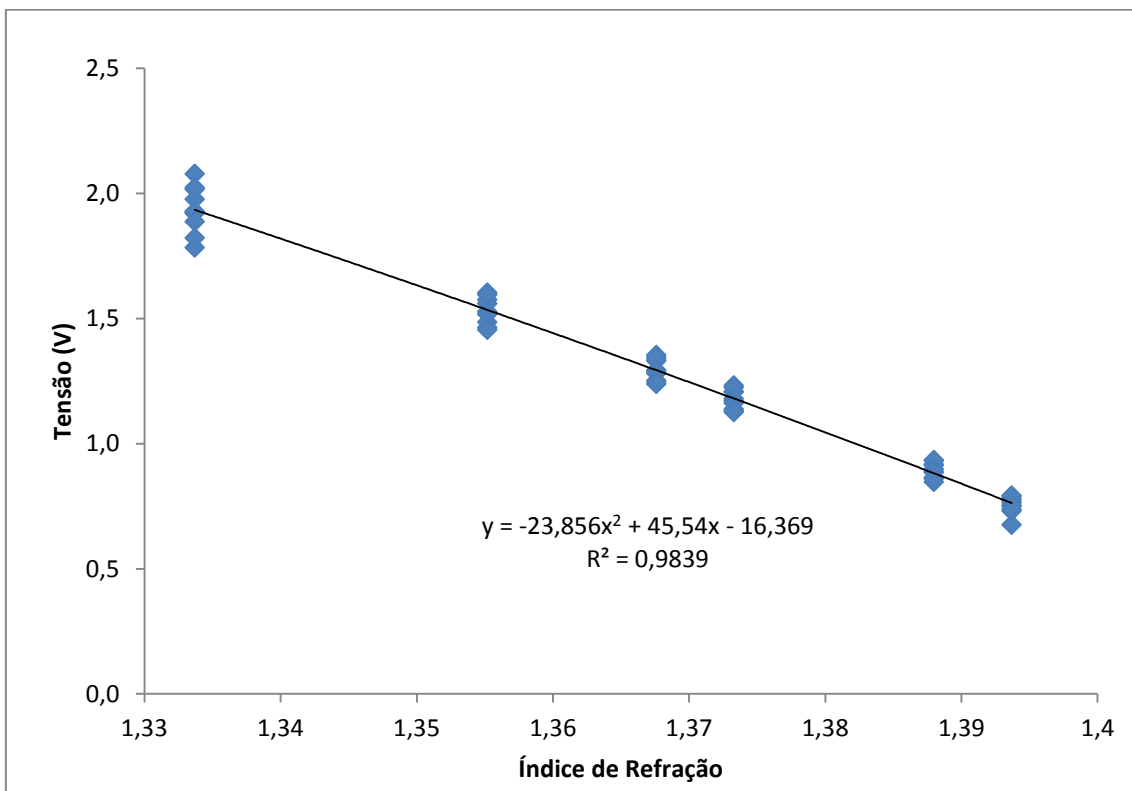


Figura B.17: Tensão em função do índice de refração do sensor 2 da fibra de 0,45 mm sem casca.

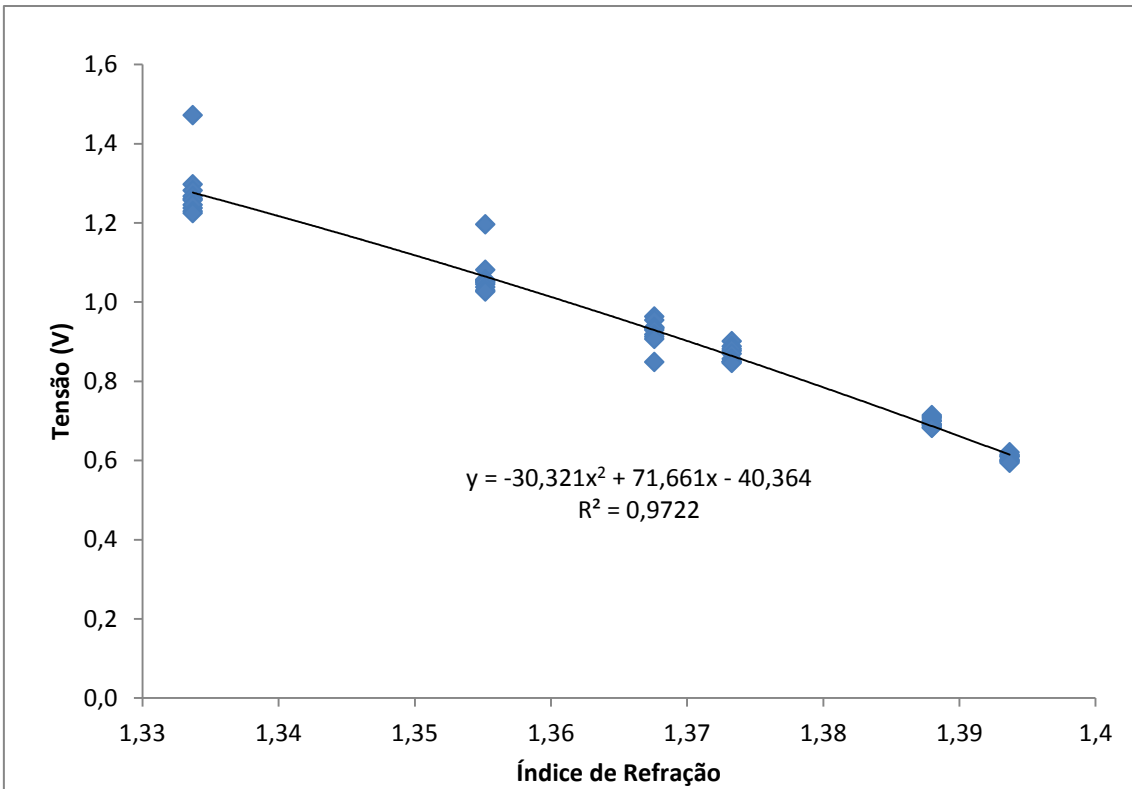


Figura B.18: Tensão em função do índice de refração do sensor 3 da fibra de 0,45 mm sem casca.

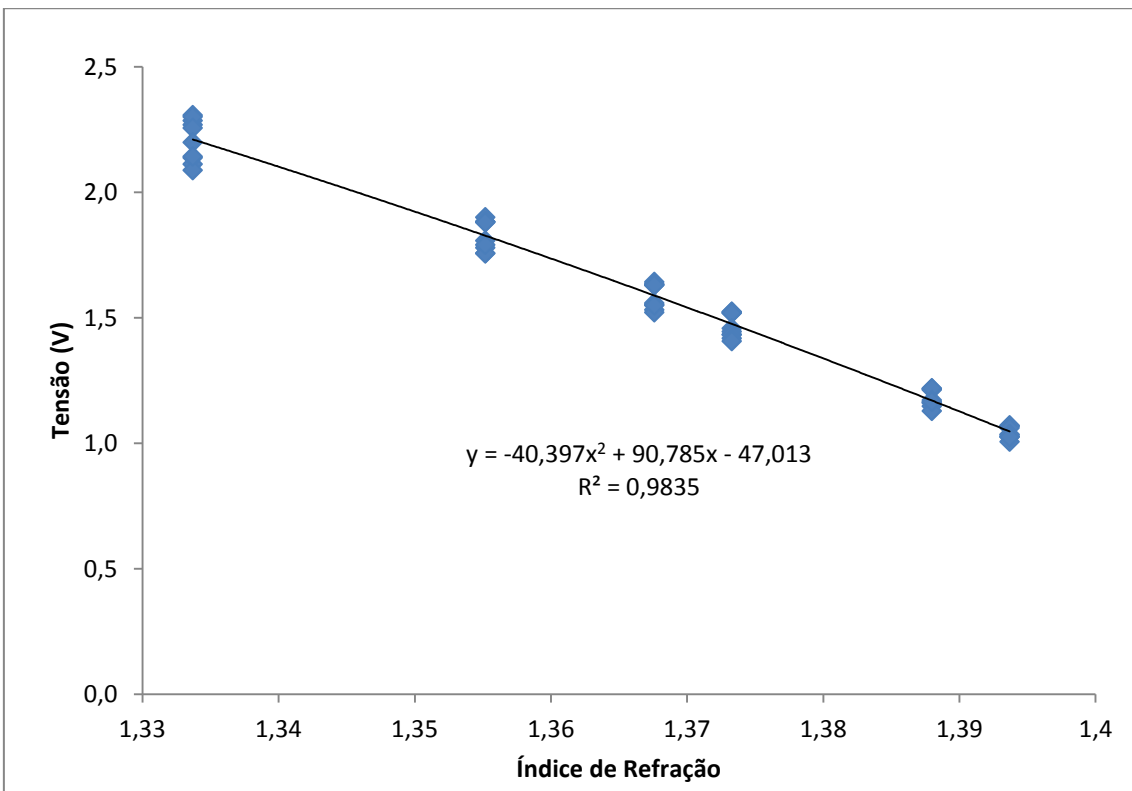


Figura B.19: Tensão em função do índice de refração do sensor 4 da fibra de 0,45 mm sem casca.

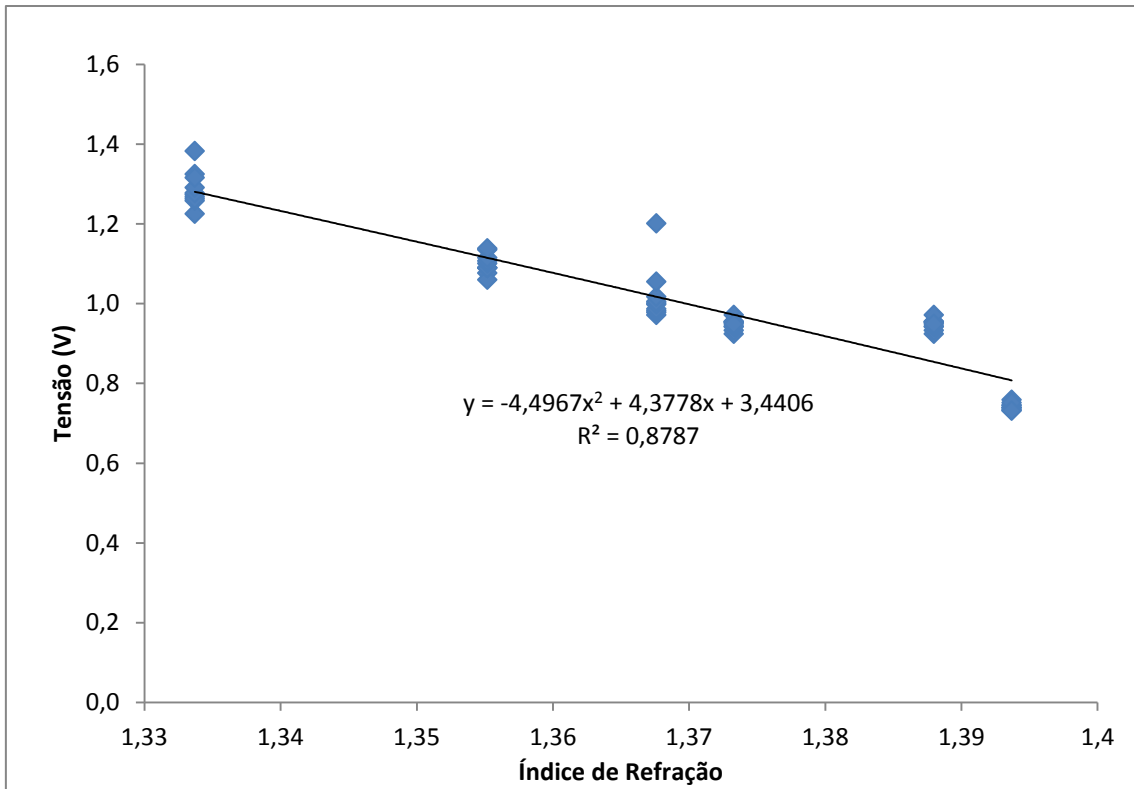


Figura B.20: Tensão em função do índice de refração do sensor 5 da fibra de 0,45 mm sem casca.

## Gráficos dos Resíduos das tensões medidas pelos sensores

### B.4 Resíduos das tensões dos sensores de fibra de 1 mm com casca e com *taper*.

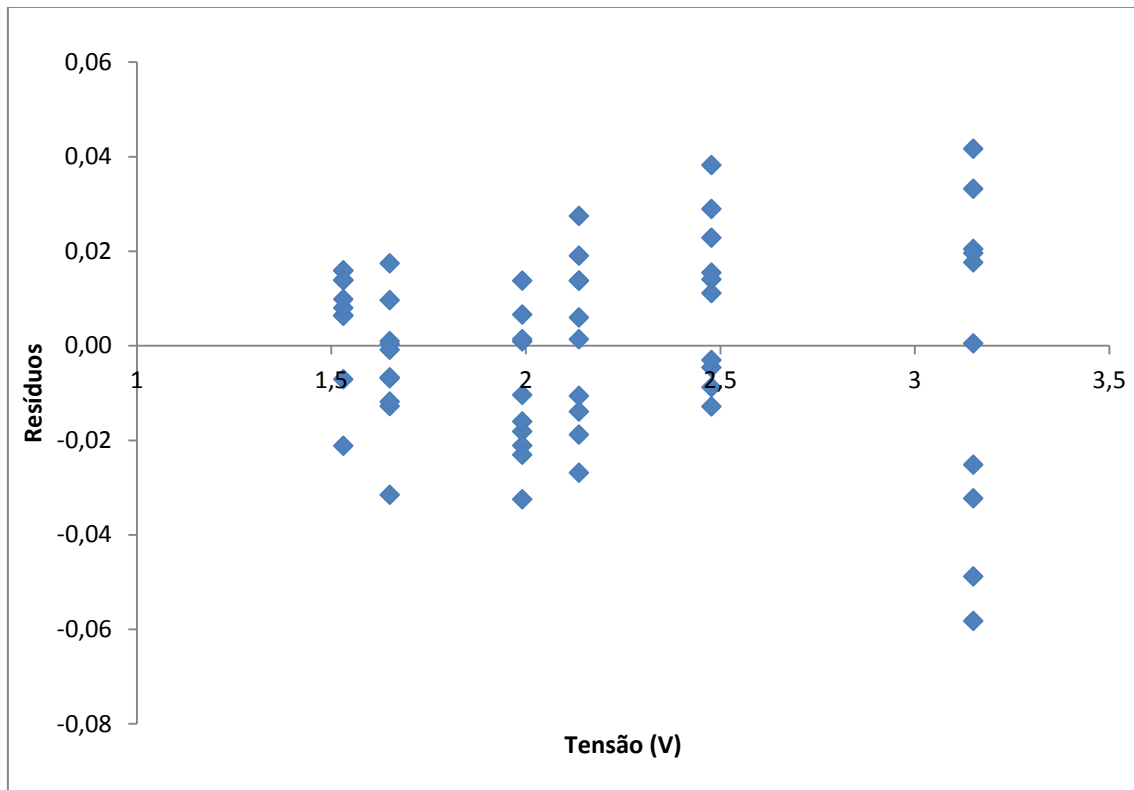


Figura B.21: Resíduos das tensões em volts do sensor 1 da fibra de 1 mm com casca e com *taper*.

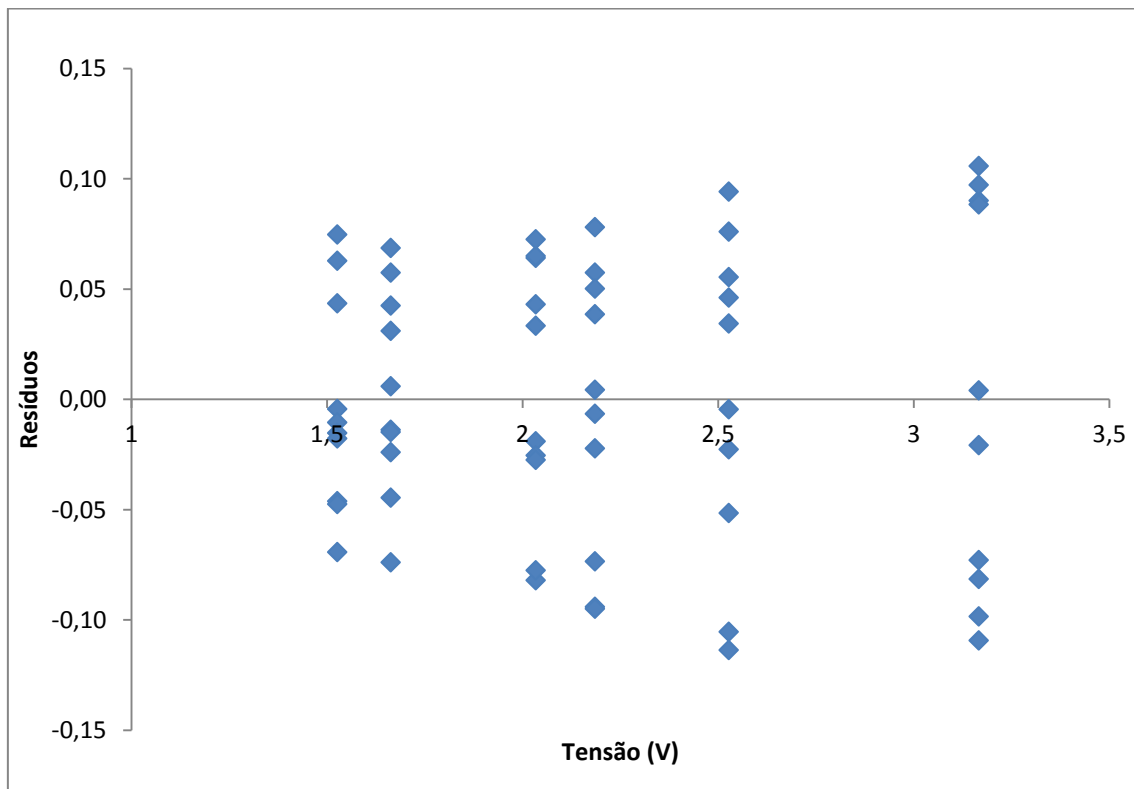


Figura B.22: Resíduos das tensões em volts do sensor 2 da fibra de 1 mm com casca e com *taper*.

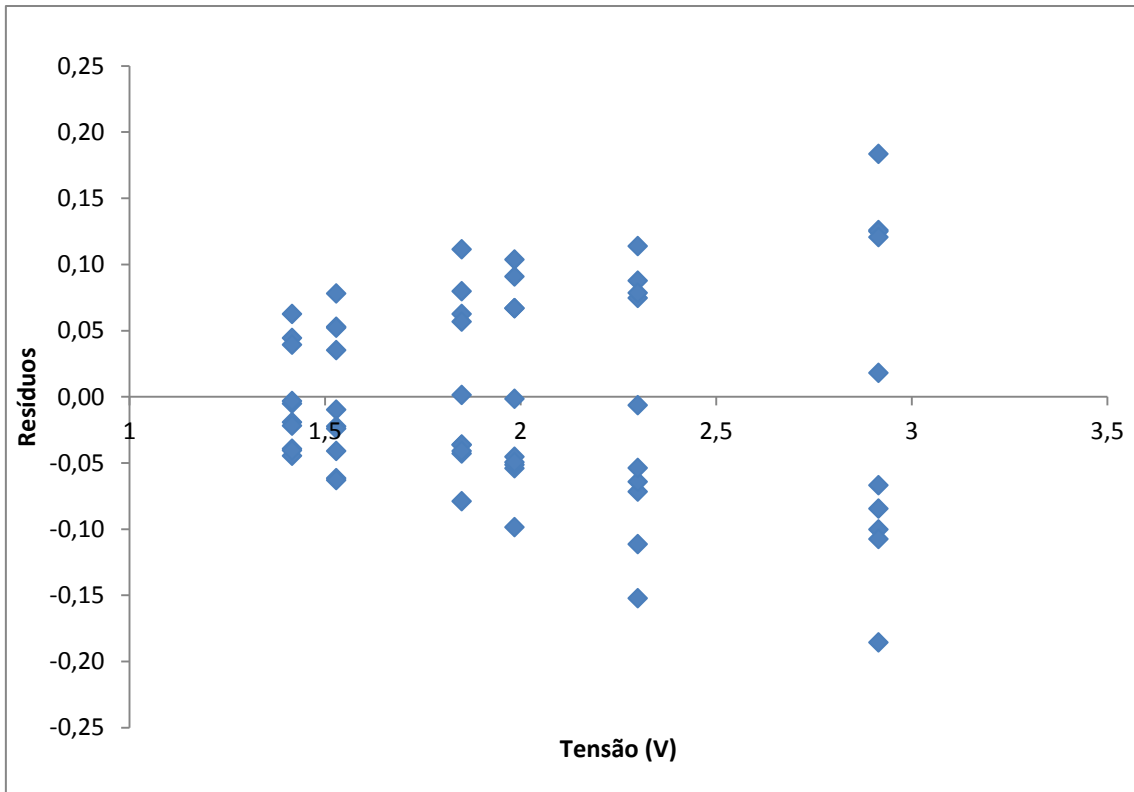


Figura B.23: Resíduos das tensões em volts do sensor 3 da fibra de 1 mm com casca e com *taper*.

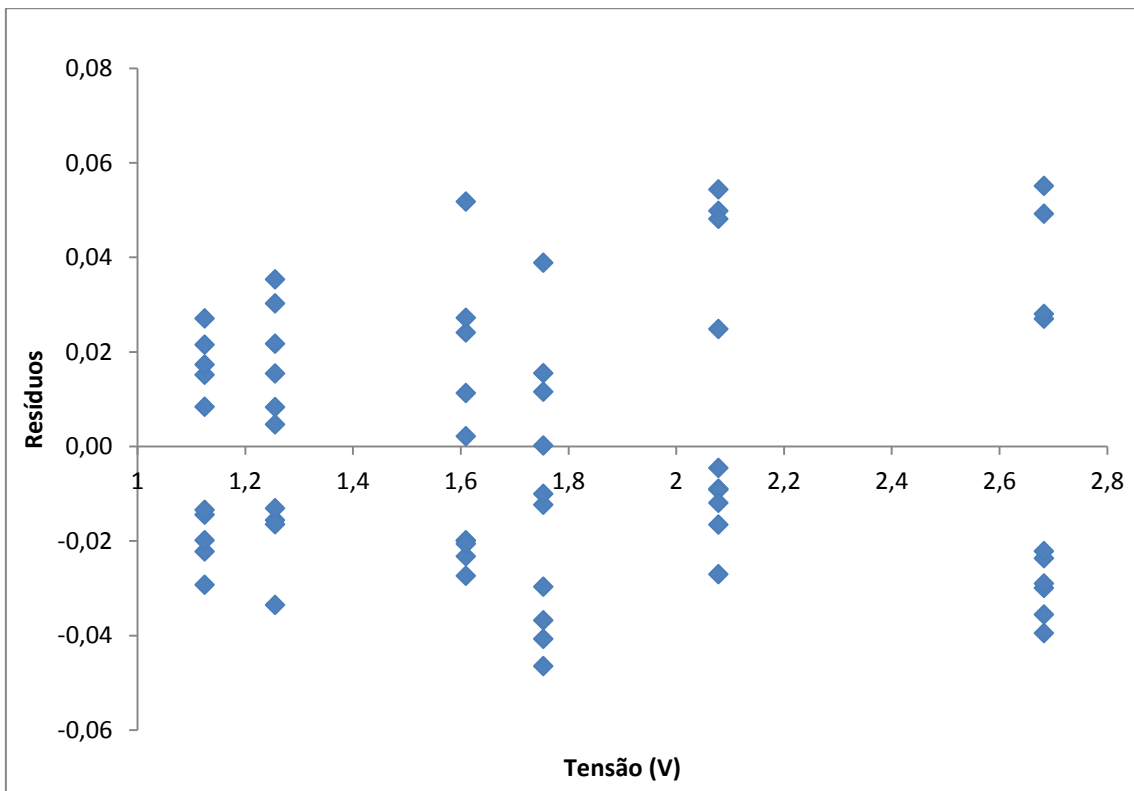


Figura B.24: Resíduos das tensões em volts do sensor 4 da fibra de 1 mm com casca e com *taper*.

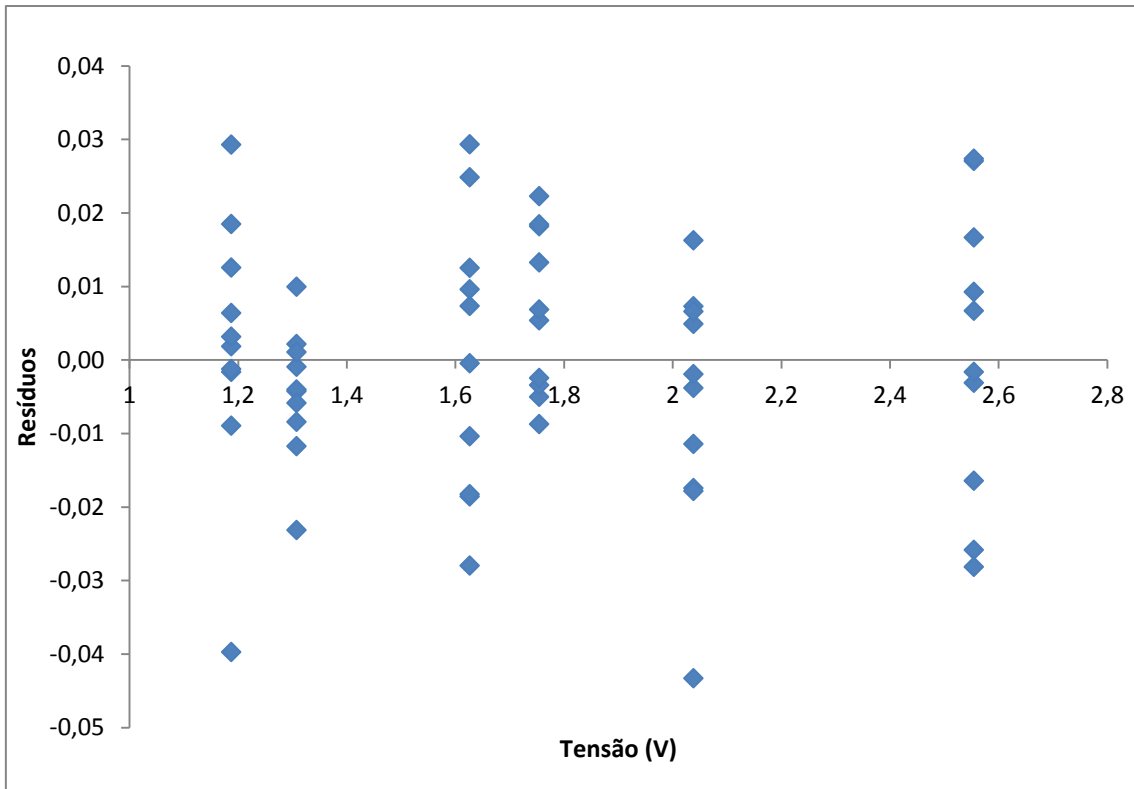


Figura B.25: Resíduos das tensões em volts do sensor 5 da fibra de 1 mm com casca e com *taper*.

### B.5 Resíduos das tensões dos sensores de fibra de 1 mm sem casca.

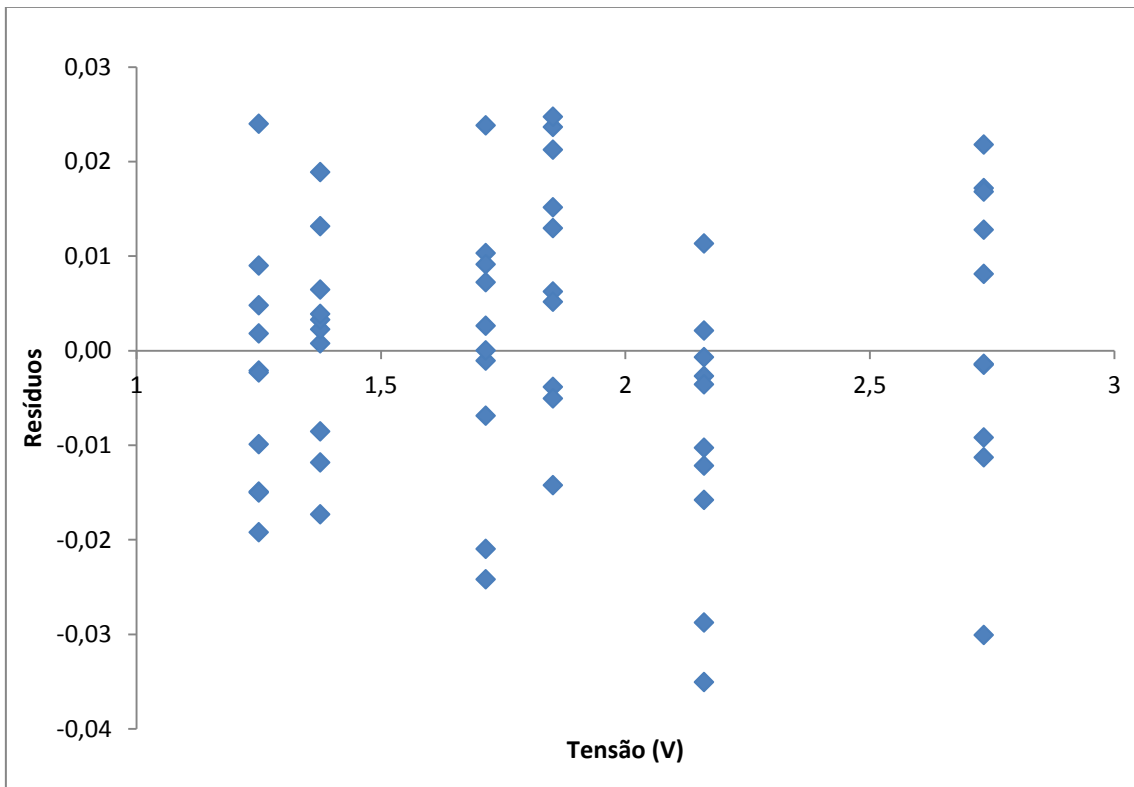


Figura B.26: Resíduos das tensões em volts do sensor 1 da fibra de 1 mm sem casca.

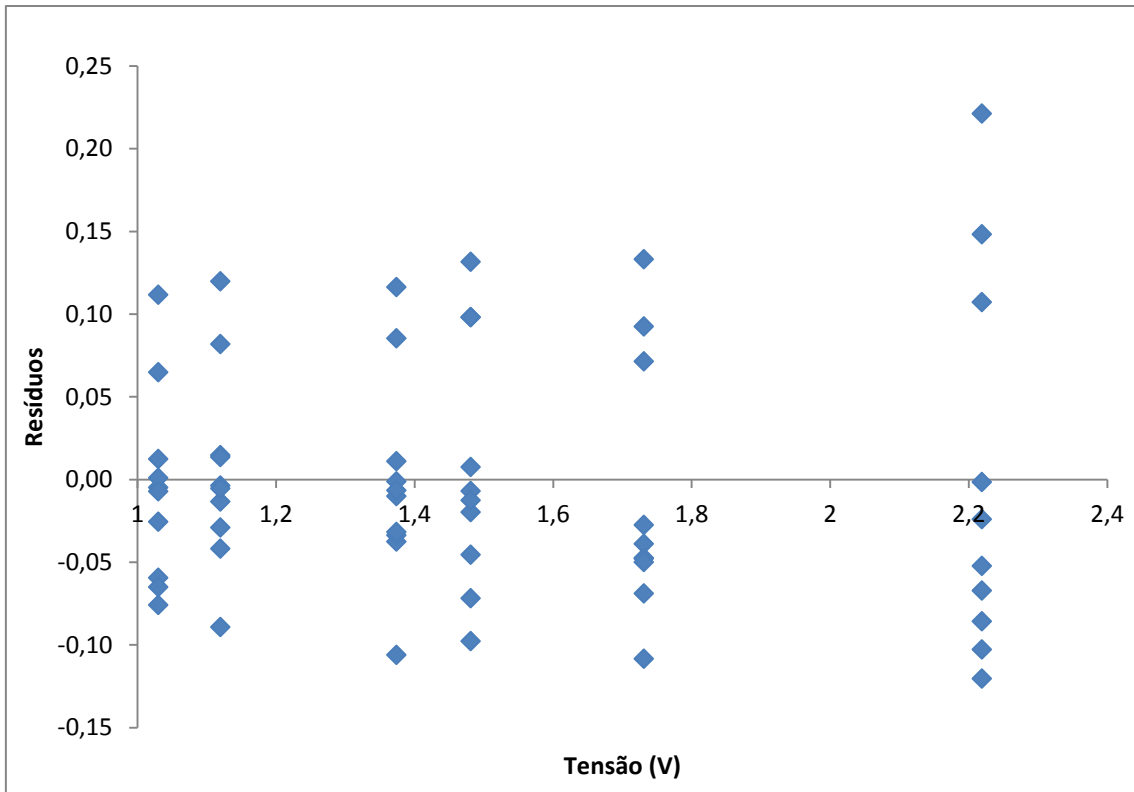


Figura B.27: Resíduos das tensões em volts do sensor 1 da fibra de 1 mm sem casca.

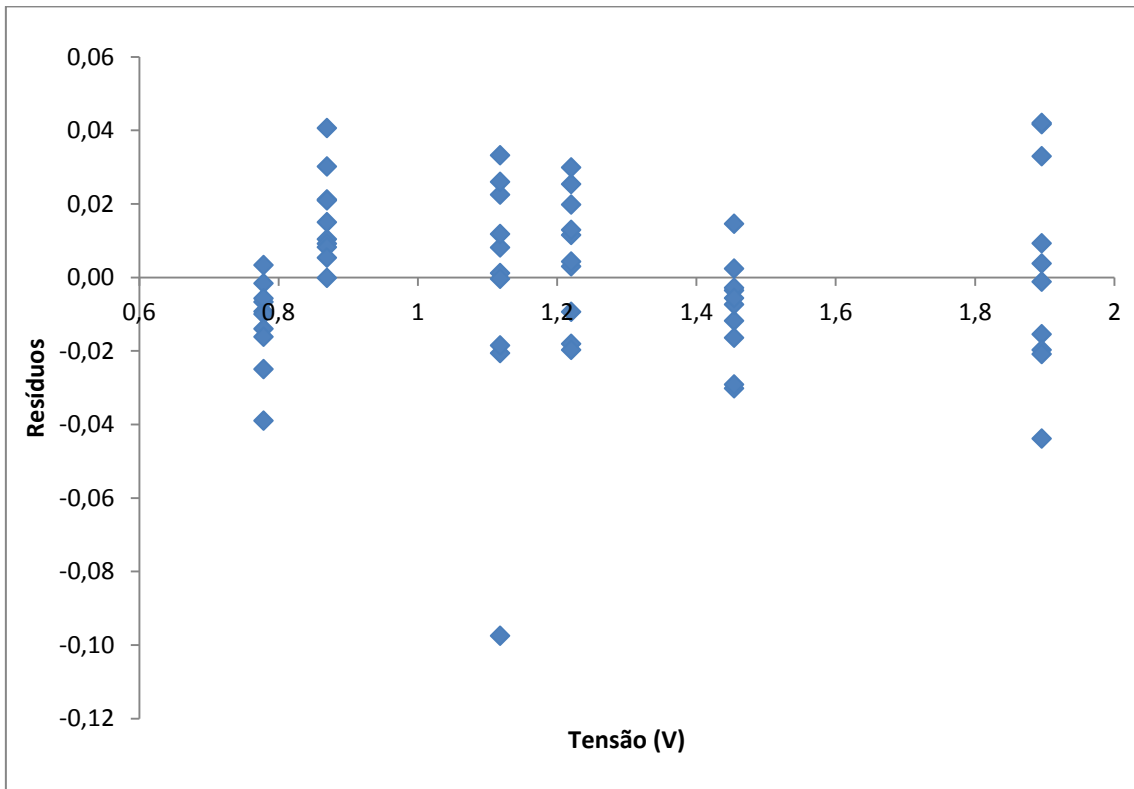


Figura B.28: Resíduos das tensões em volts do sensor 3 da fibra de 1 mm sem casca.

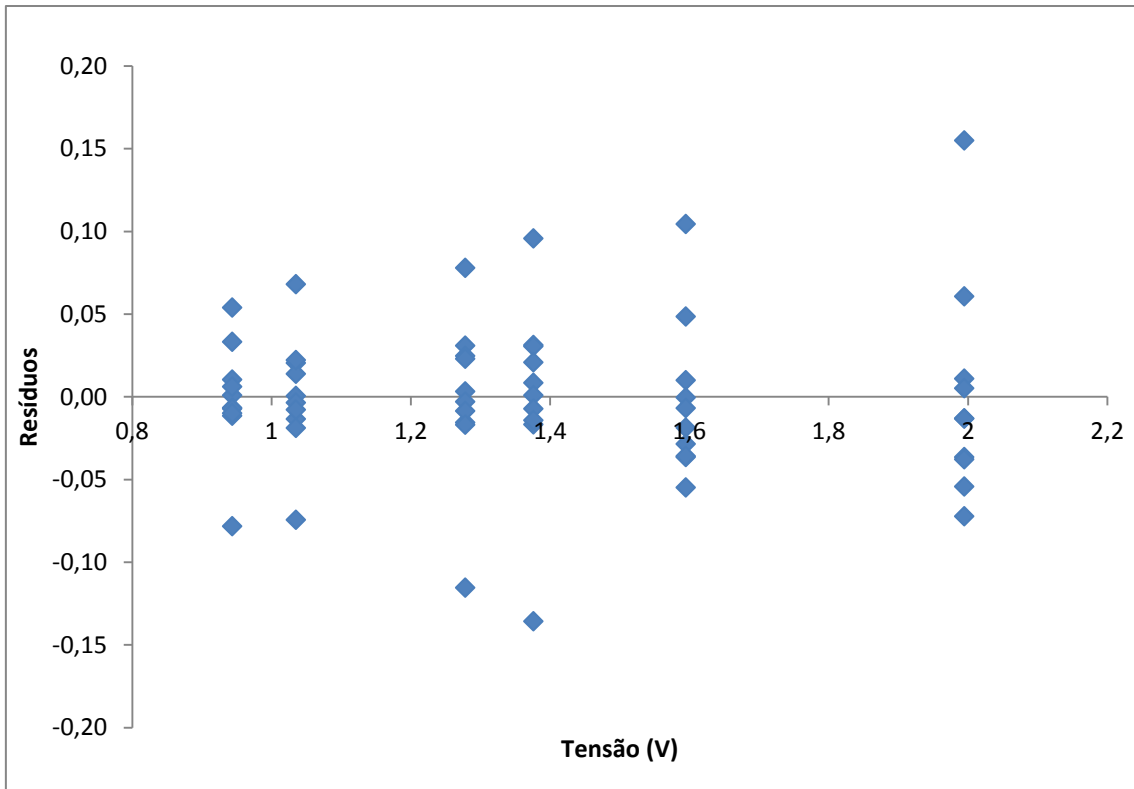


Figura B.29: Resíduos das tensões em volts do sensor 4 da fibra de 1 mm sem casca.

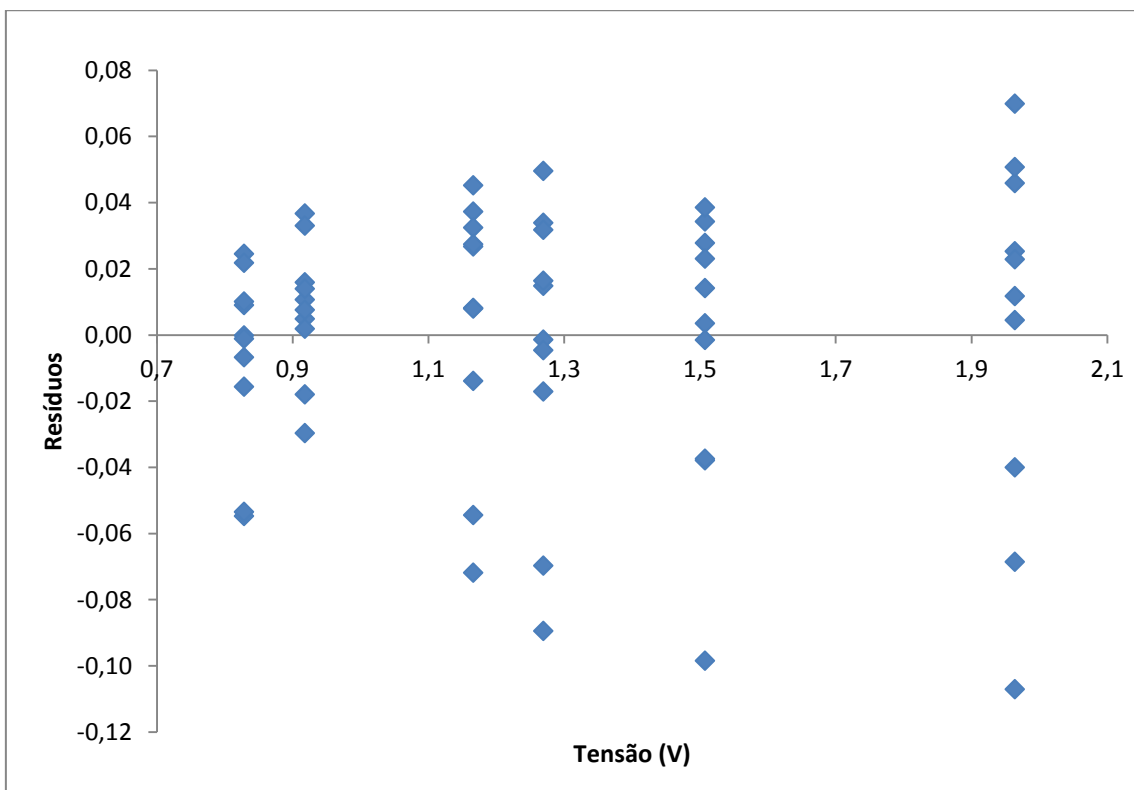


Figura B.30: Resíduos das tensões em volts do sensor 5 da fibra de 1 mm sem casca.



### B.6 Resíduos das tensões dos sensores de fibra de 1 mm com casca e sem taper.

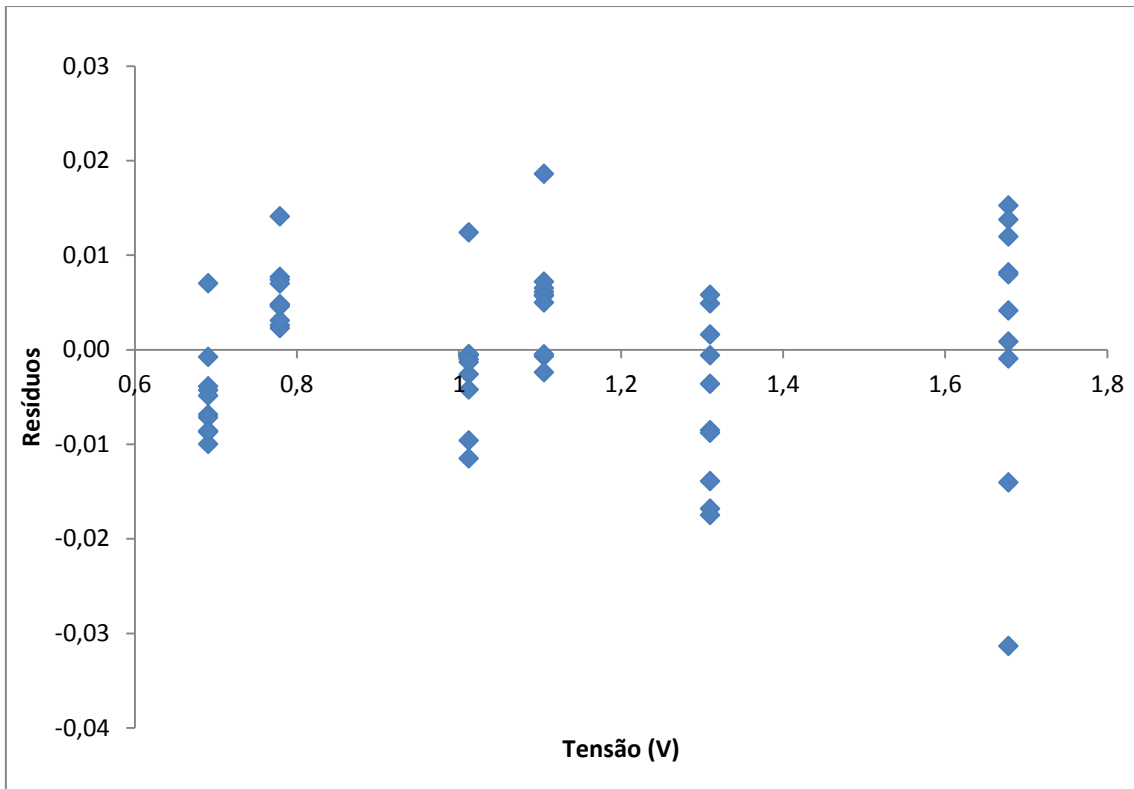


Figura B.31: Resíduos das tensões em volts do sensor 1 da fibra de 1 mm com casca e sem taper.

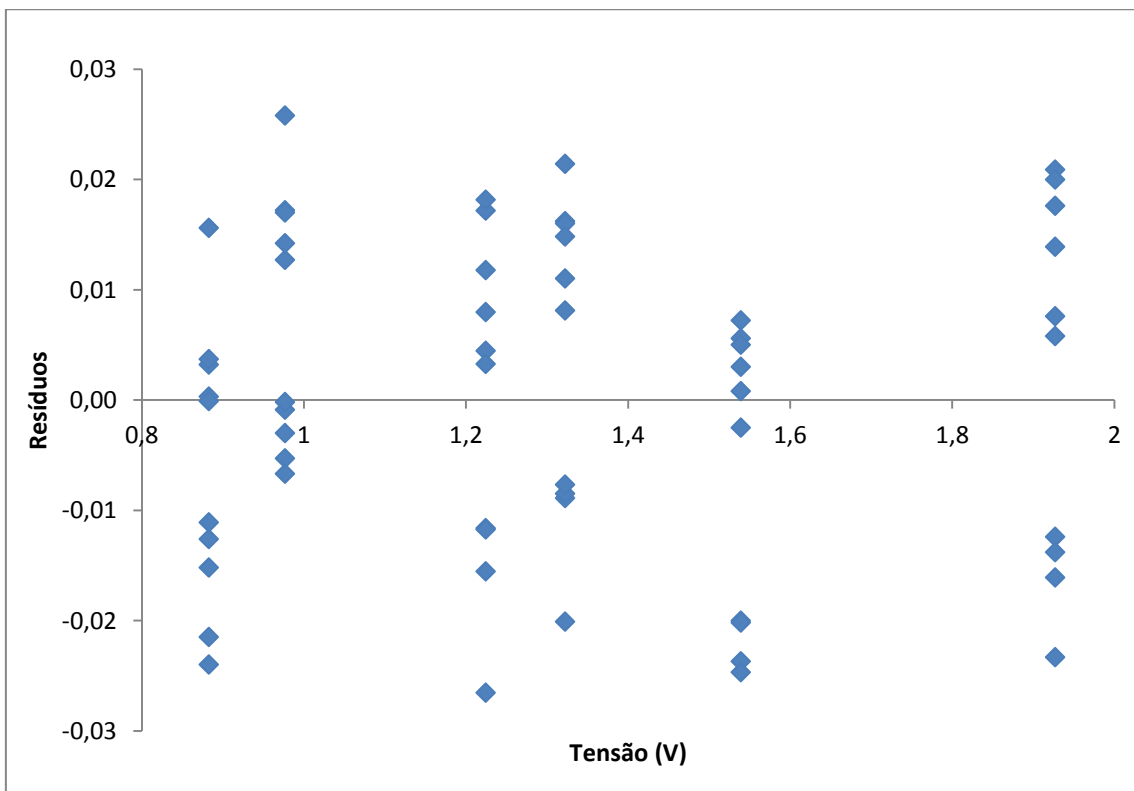


Figura B.32: Resíduos das tensões em volts do sensor 2 da fibra de 1 mm com casca e sem taper.

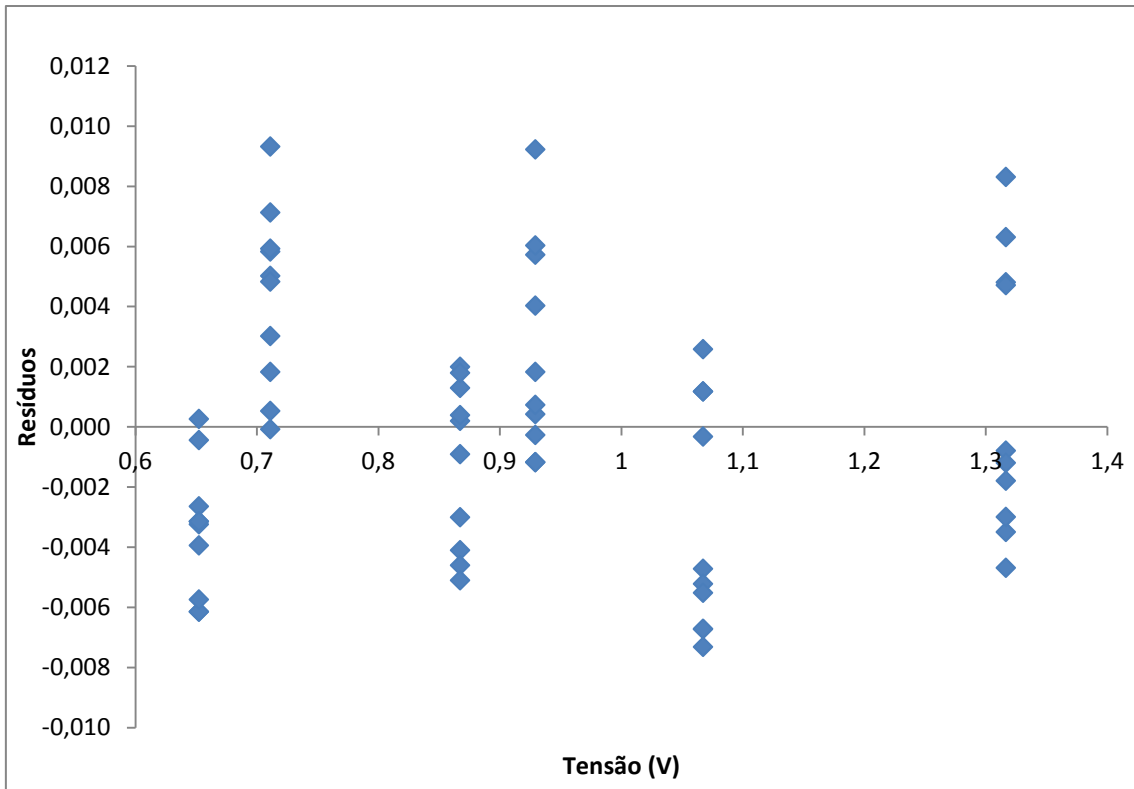


Figura B.33: Resíduos das tensões em volts do sensor 3 da fibra de 1 mm com casca e sem taper.

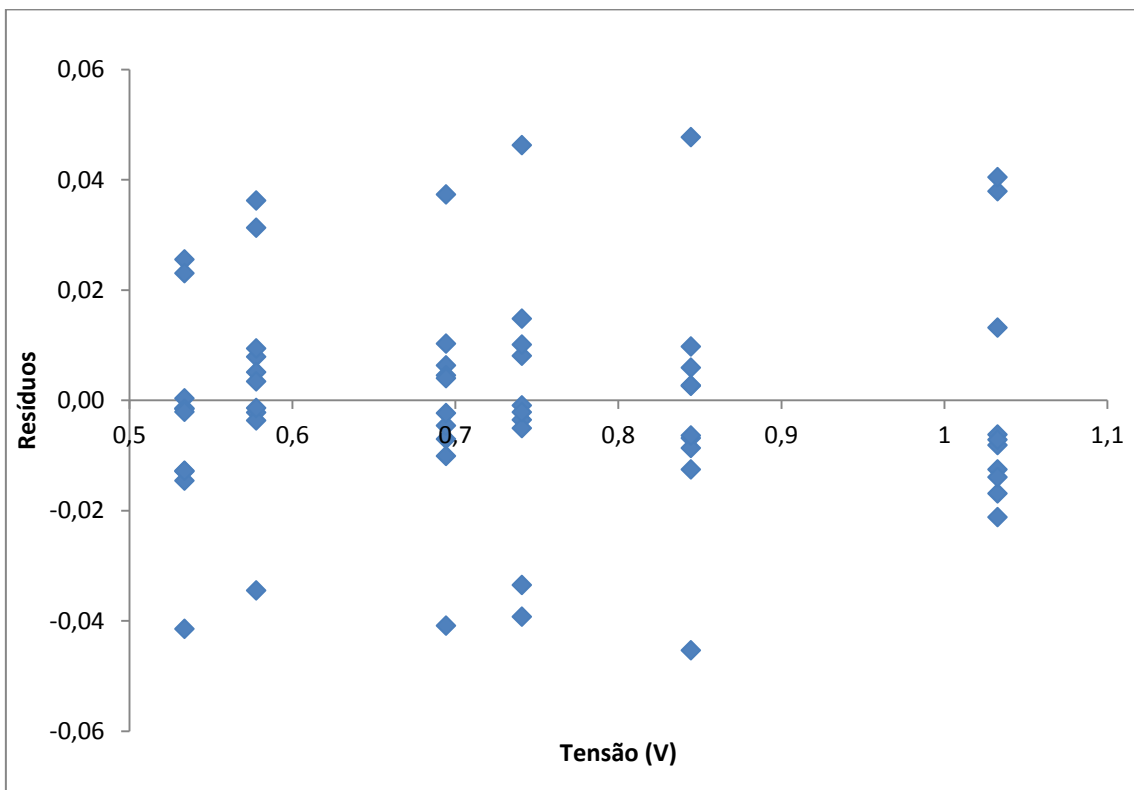


Figura B.34: Resíduos das tensões em volts do sensor 4 da fibra de 1 mm com casca e sem taper.

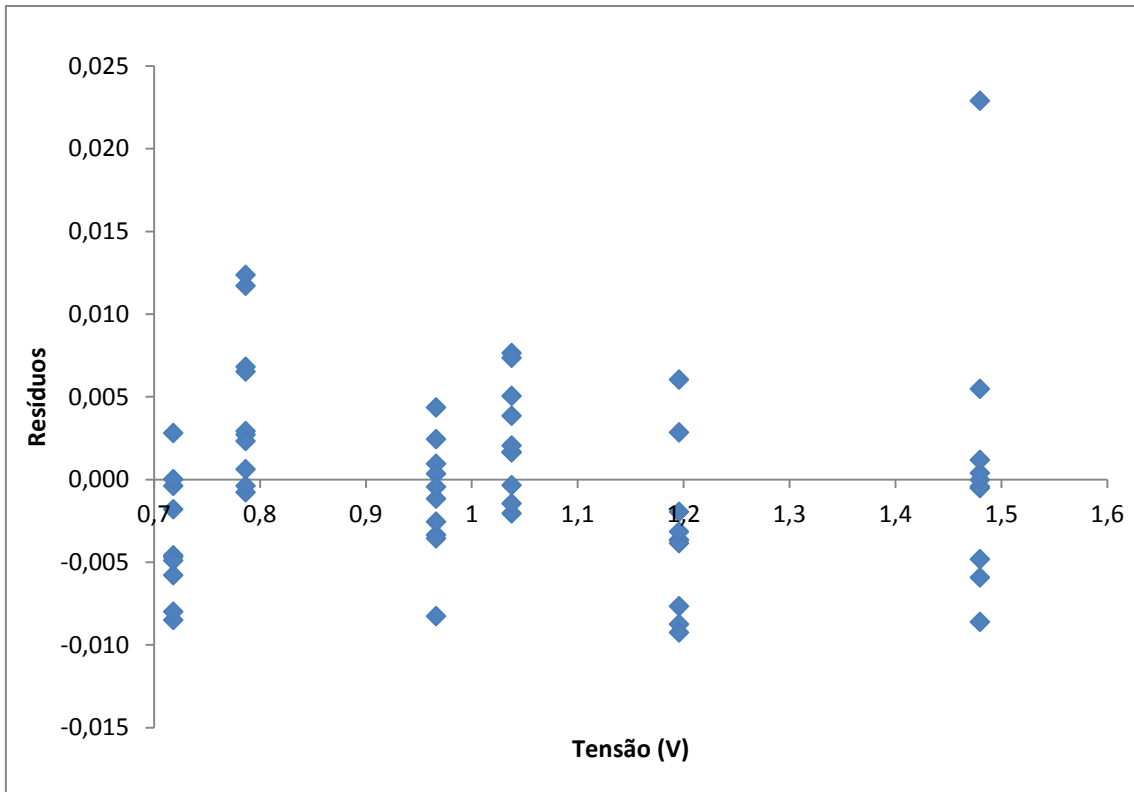


Figura B.35: Resíduos das tensões em volts do sensor 5 da fibra de 1 mm com casca e sem taper.

**B.7 Resíduos das tensões dos sensores de fibra de 0,45 mm sem casca.**

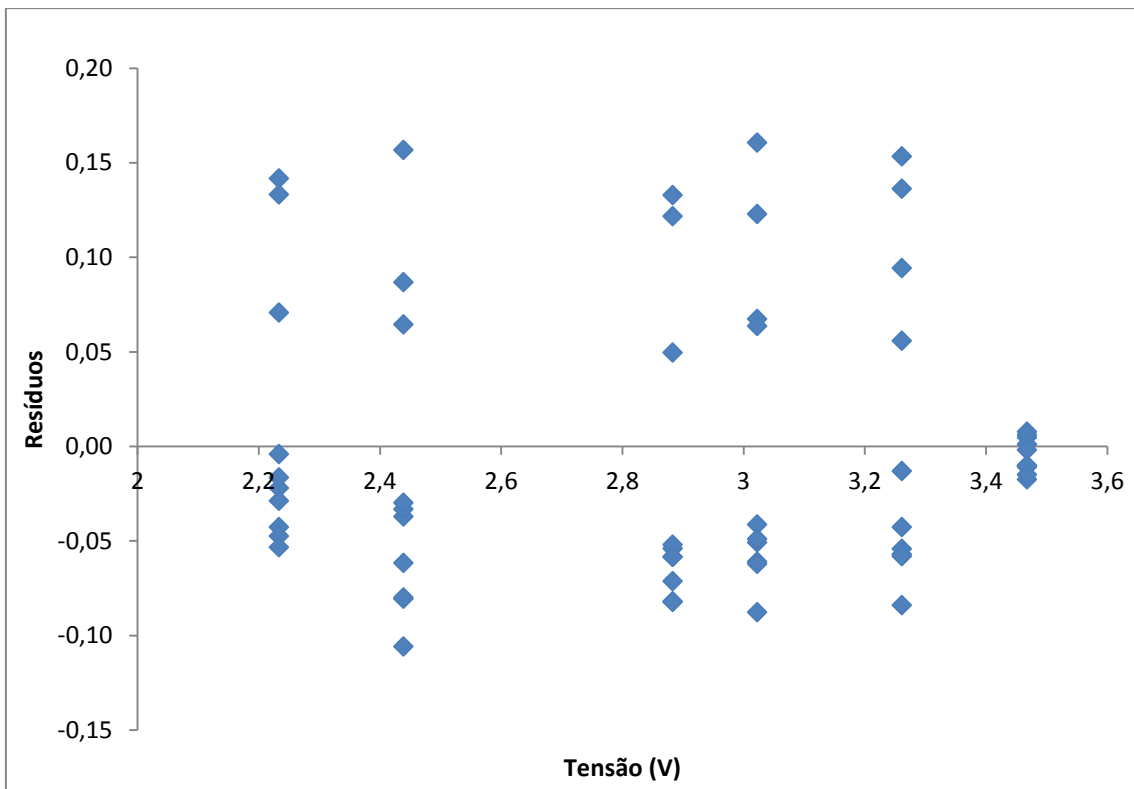


Figura B.36: Resíduos das tensões em volts do sensor 1 da fibra de 0,45 mm sem casca.

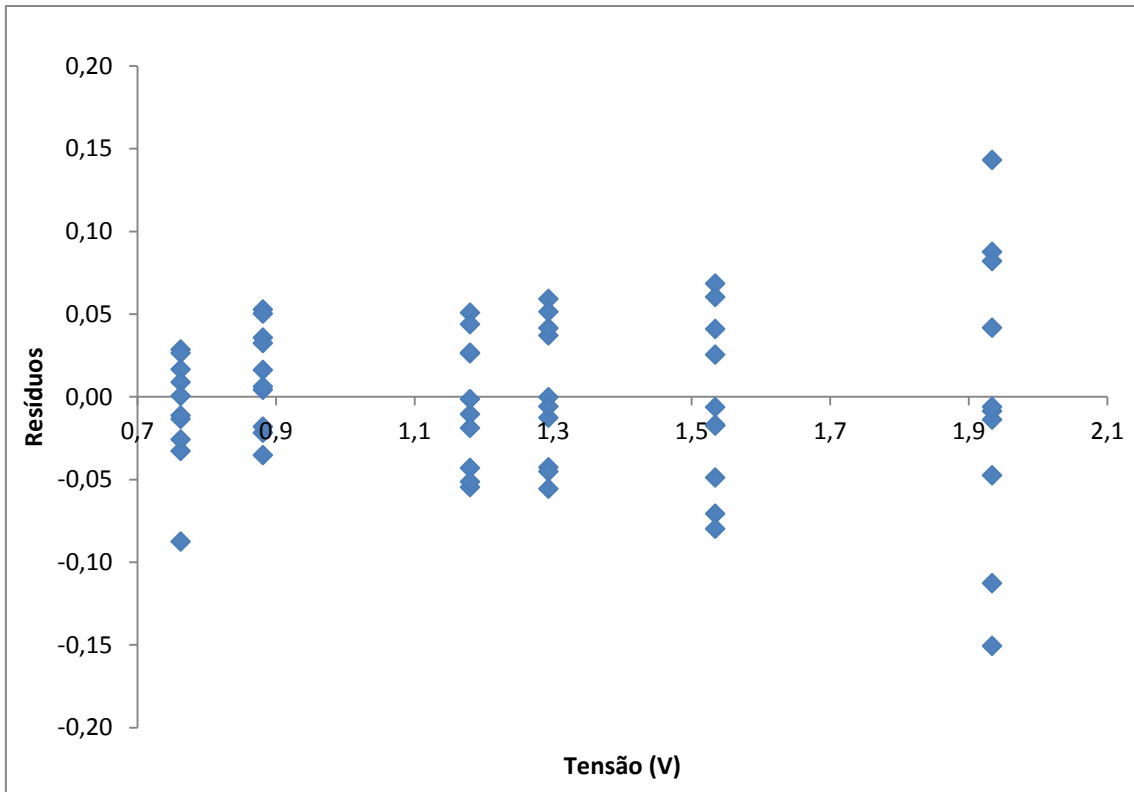


Figura B.37: Resíduos das tensões em volts do sensor 2 da fibra de 0,45 mm sem casca.

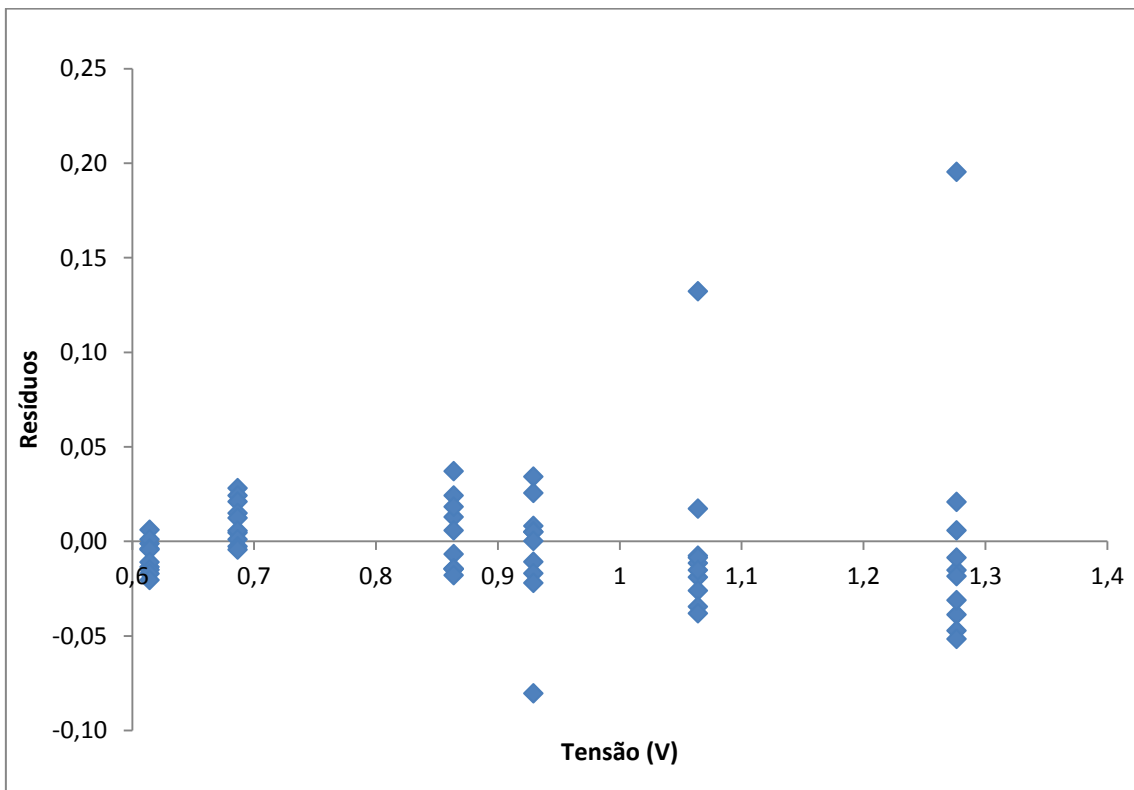


Figura B.38: Resíduos das tensões em volts do sensor 3 da fibra de 0,45 mm sem casca.

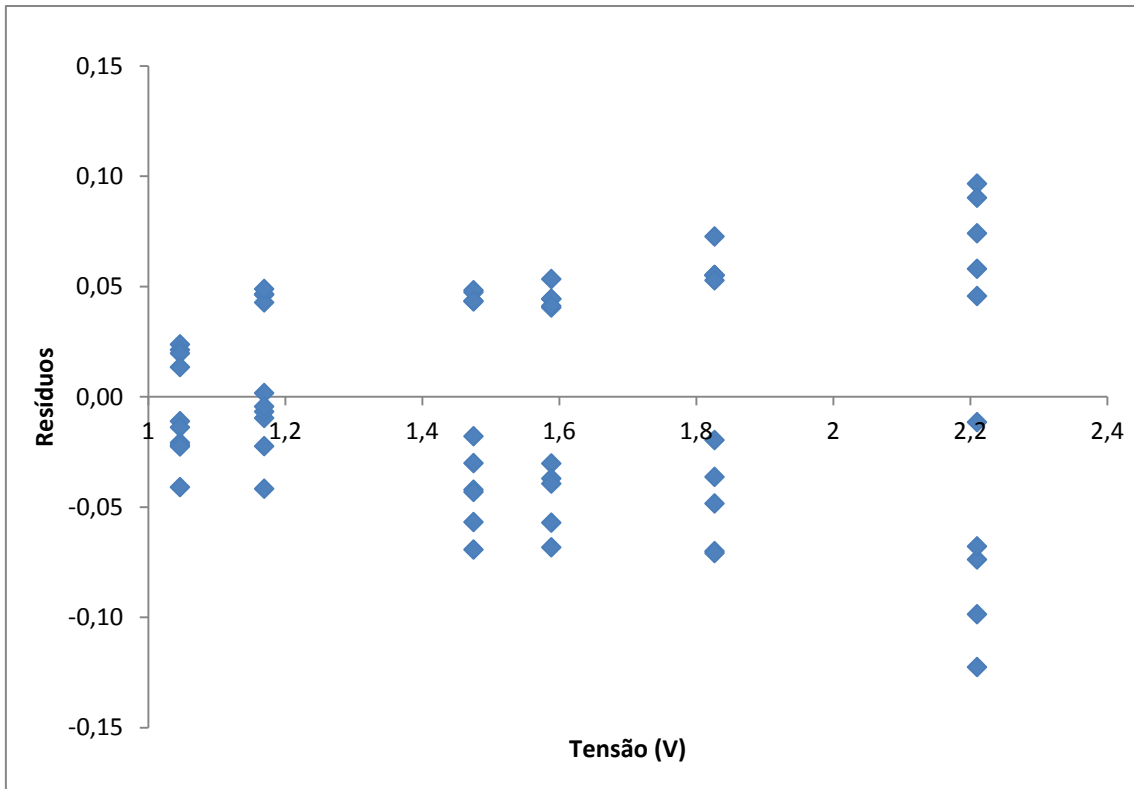


Figura B.39: Resíduos das tensões em volts do sensor 4 da fibra de 0,45 mm sem casca.

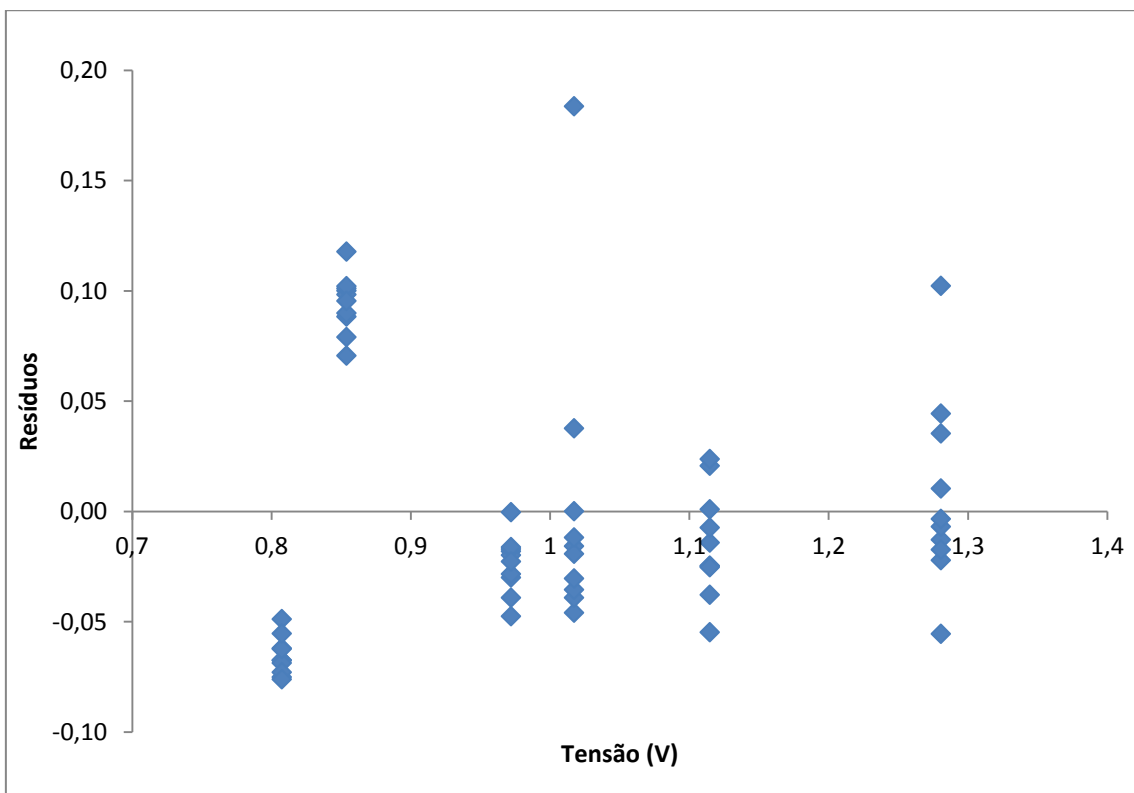


Figura B.40: Resíduos das tensões em volts do sensor 5 da fibra de 0,45 mm sem casca.

## Gráficos dos Resíduos dos índice sde refração medidos pelos sensores

### B.8 Resíduos dos índices de refração dos sensores de fibra de 1 mm com casca e com *taper*.

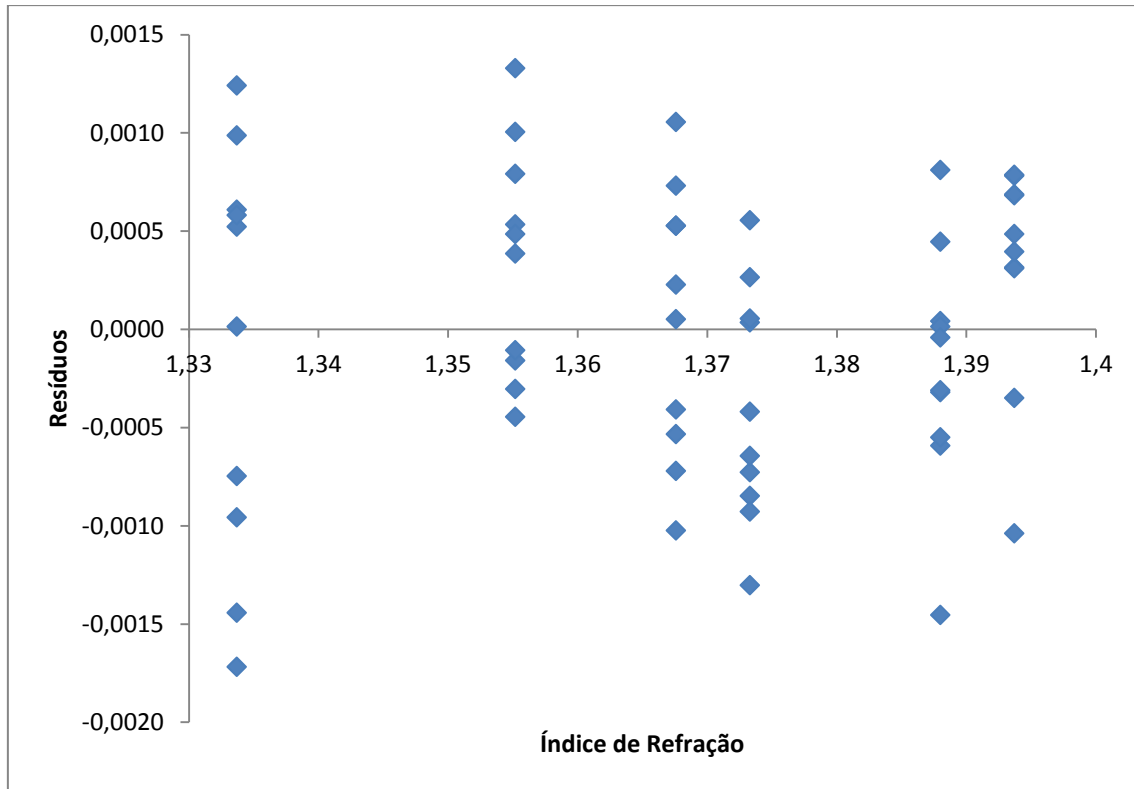


Figura B.41: Resíduos dos índices de refração do sensor 1 da fibra de 1 mm com casca e com *taper*.

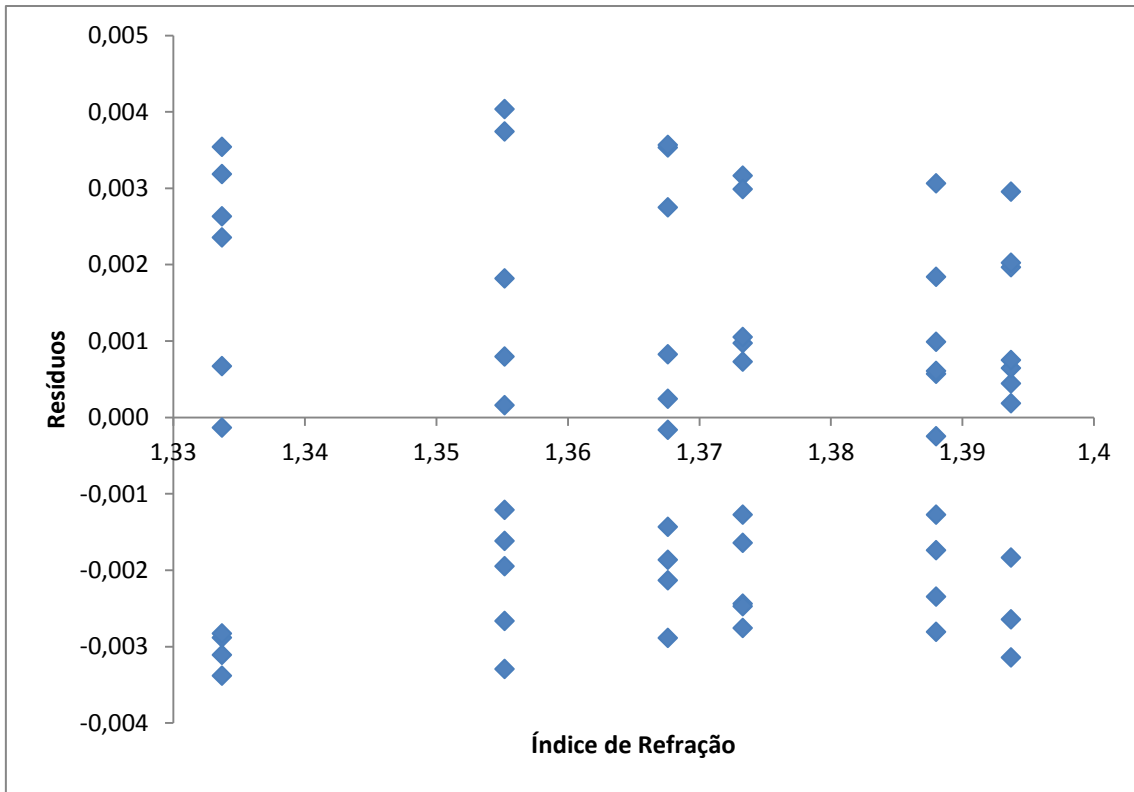


Figura B.42: Resíduos dos índices de refração do sensor 2 da fibra de 1 mm com casca e com *taper*.

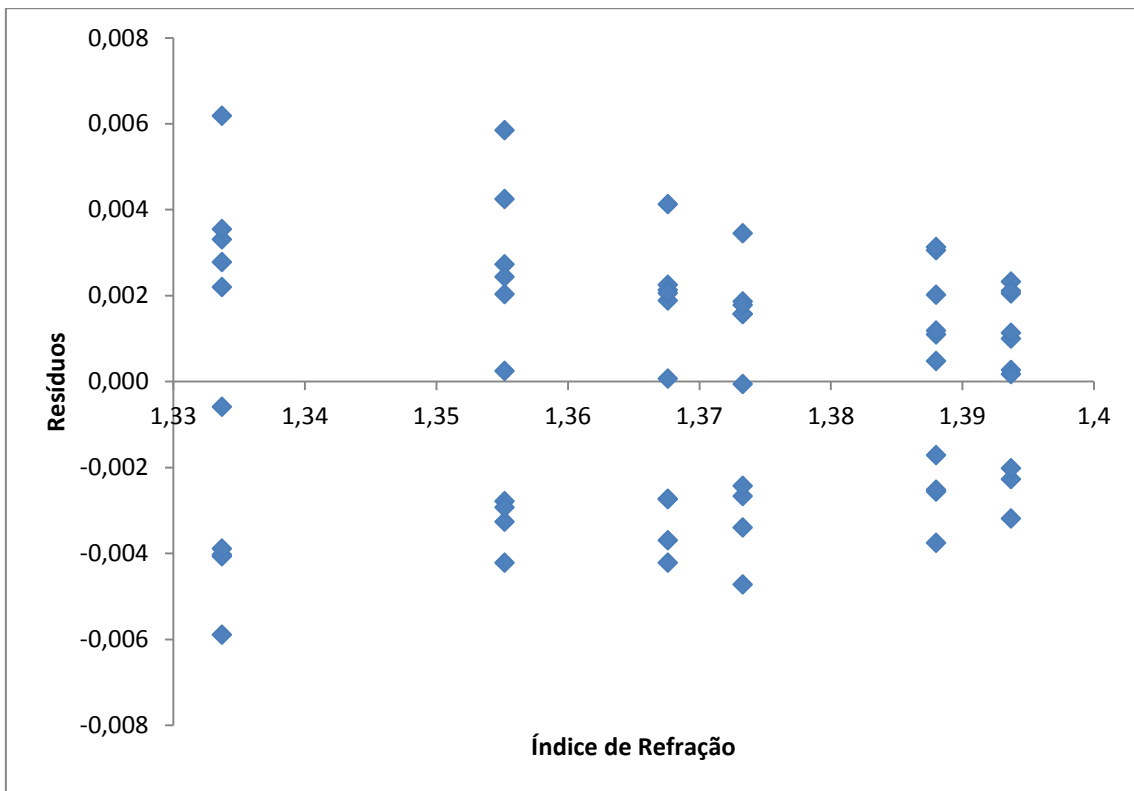


Figura B.43: Resíduos dos índices de refração do sensor 3 da fibra de 1 mm com casca e com *taper*.

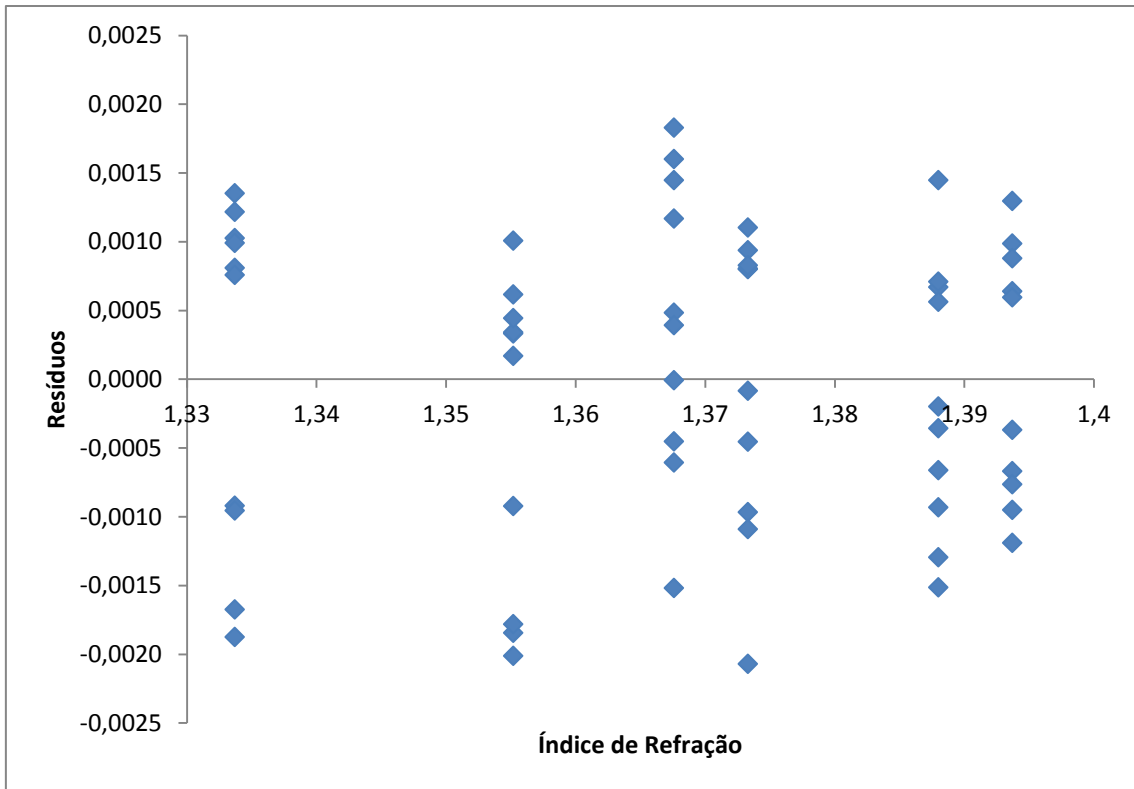


Figura B.44: Resíduos dos índices de refração do sensor 4 da fibra de 1 mm com casca e com *taper*.

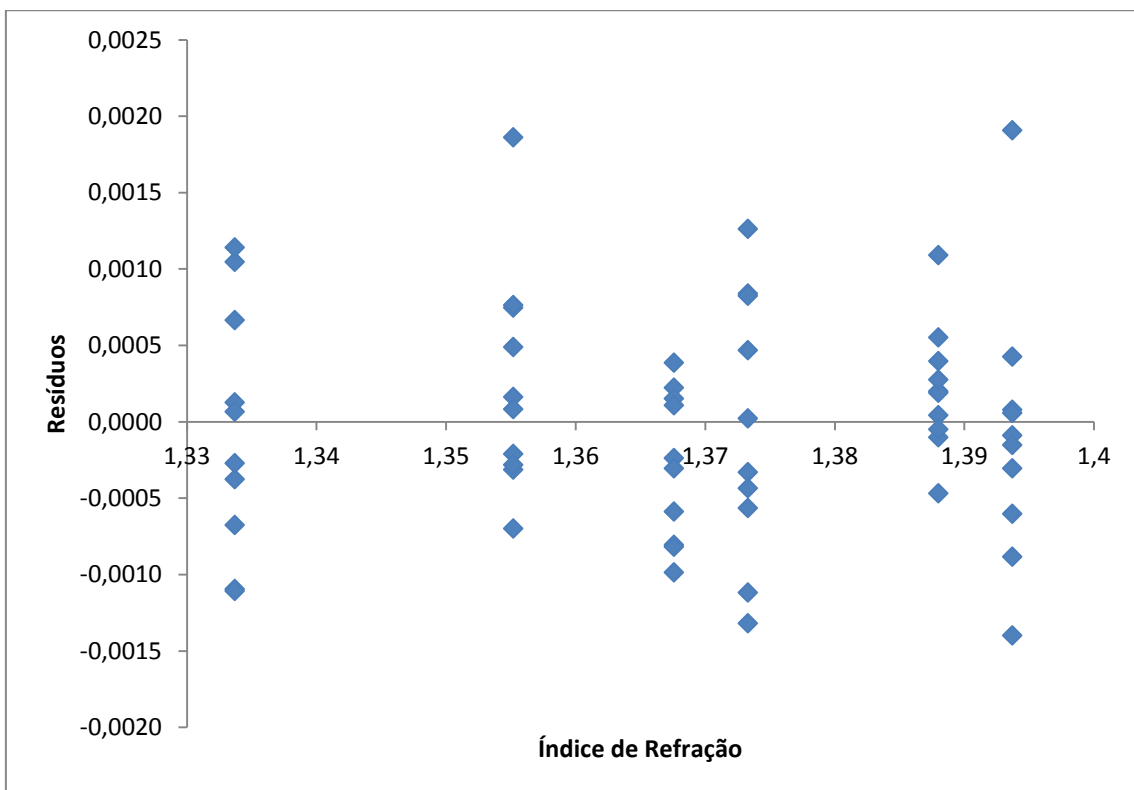


Figura B.45: Resíduos dos índices de refração do sensor 5 da fibra de 1 mm com casca e com *taper*.



### B.9 Resíduos dos índices de refração dos sensores de fibra de 1 mm sem casca.

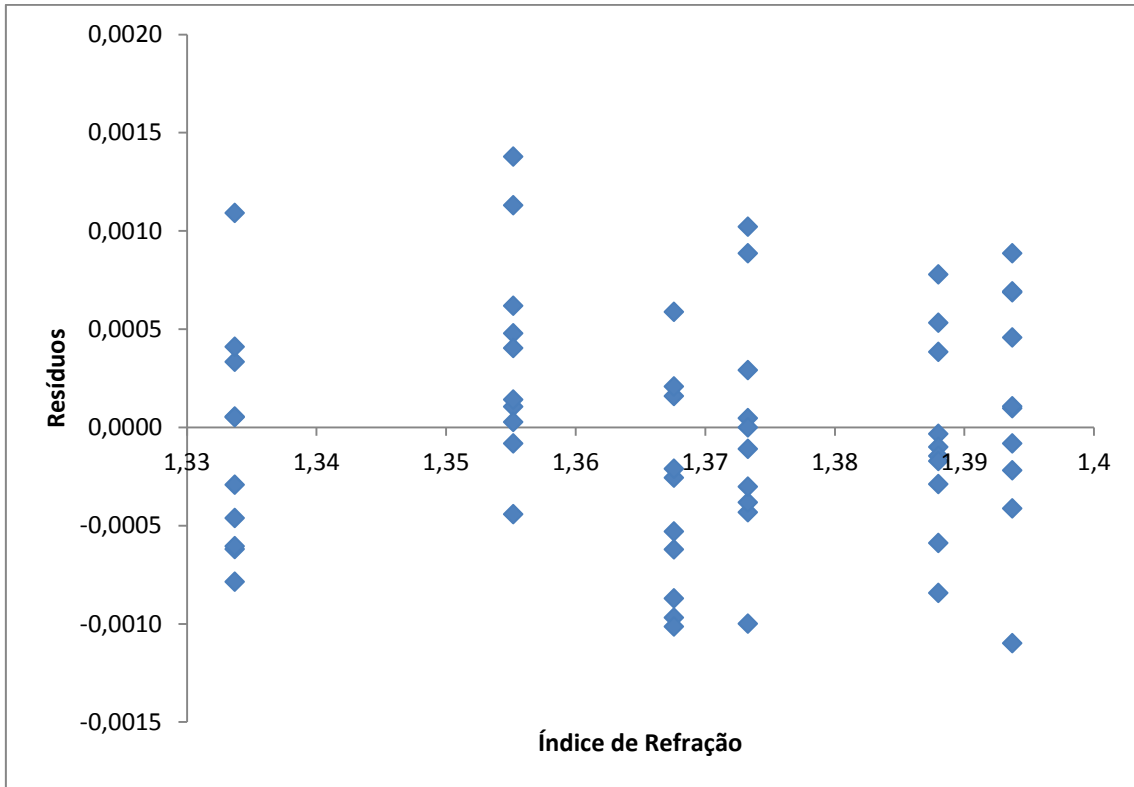


Figura B.46: Resíduos dos índices de refração do sensor 1 da fibra de 1 mm sem casca.

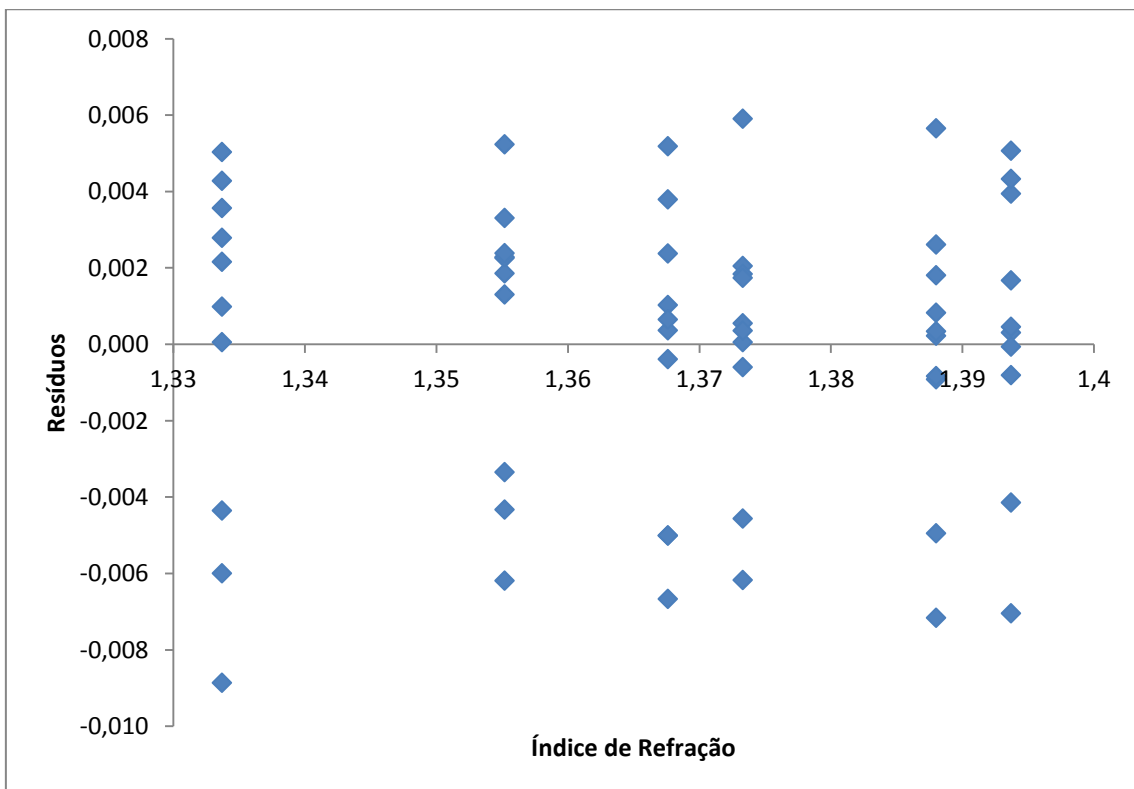
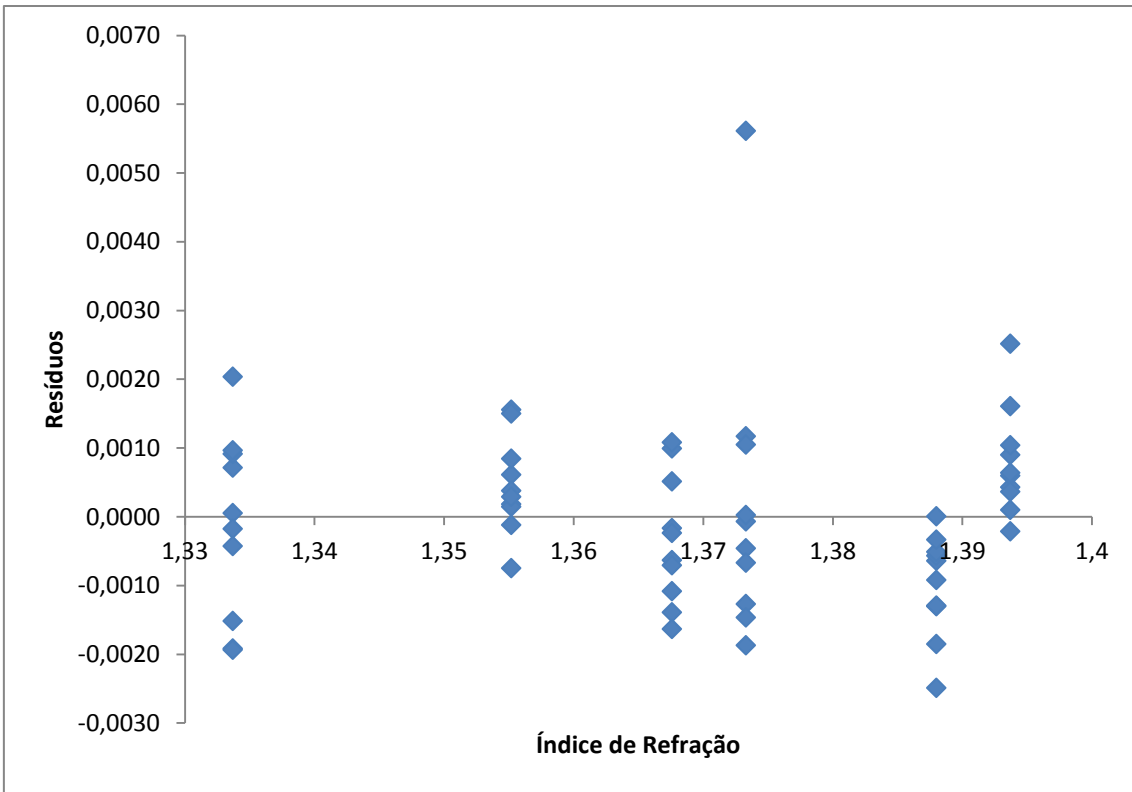
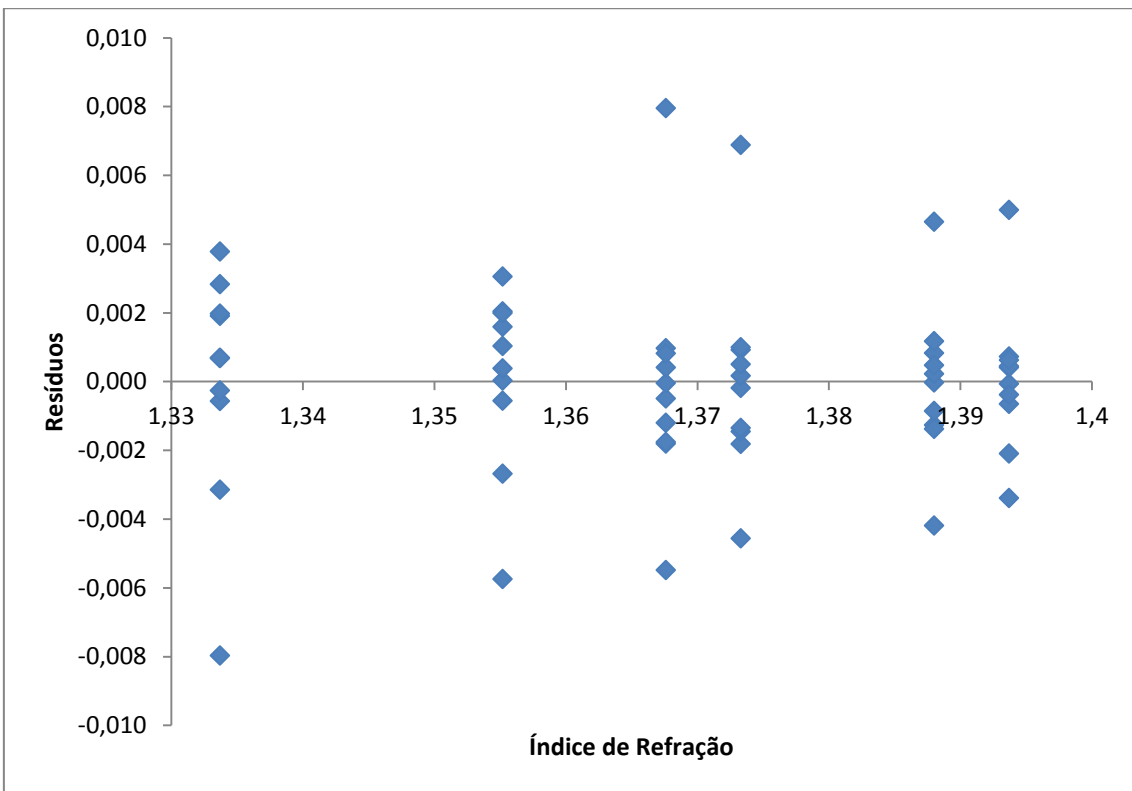


Figura B.47: Resíduos dos índices de refração do sensor 2 da fibra de 1 mm sem casca.



**Figura B.48: Resíduos dos índices de refração do sensor 3 da fibra de 1 mm sem casca.**



**Figura B.49: Resíduos dos índices de refração do sensor 4 da fibra de 1 mm sem casca.**

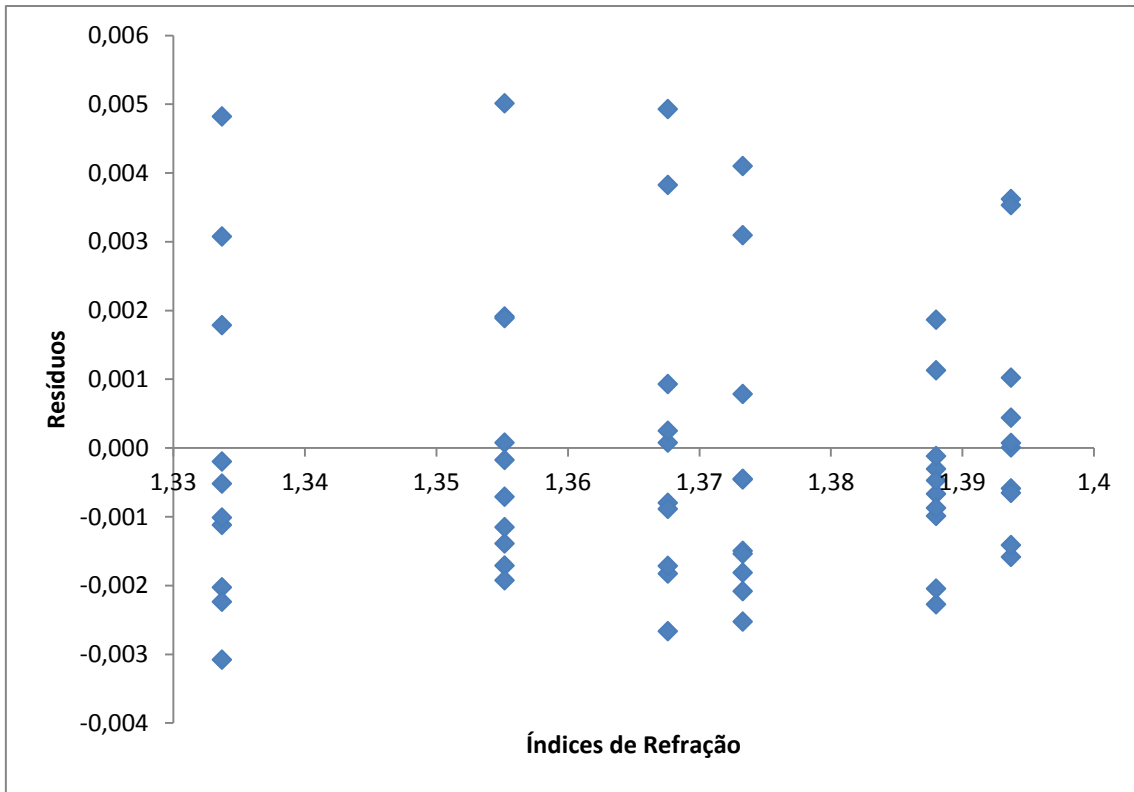
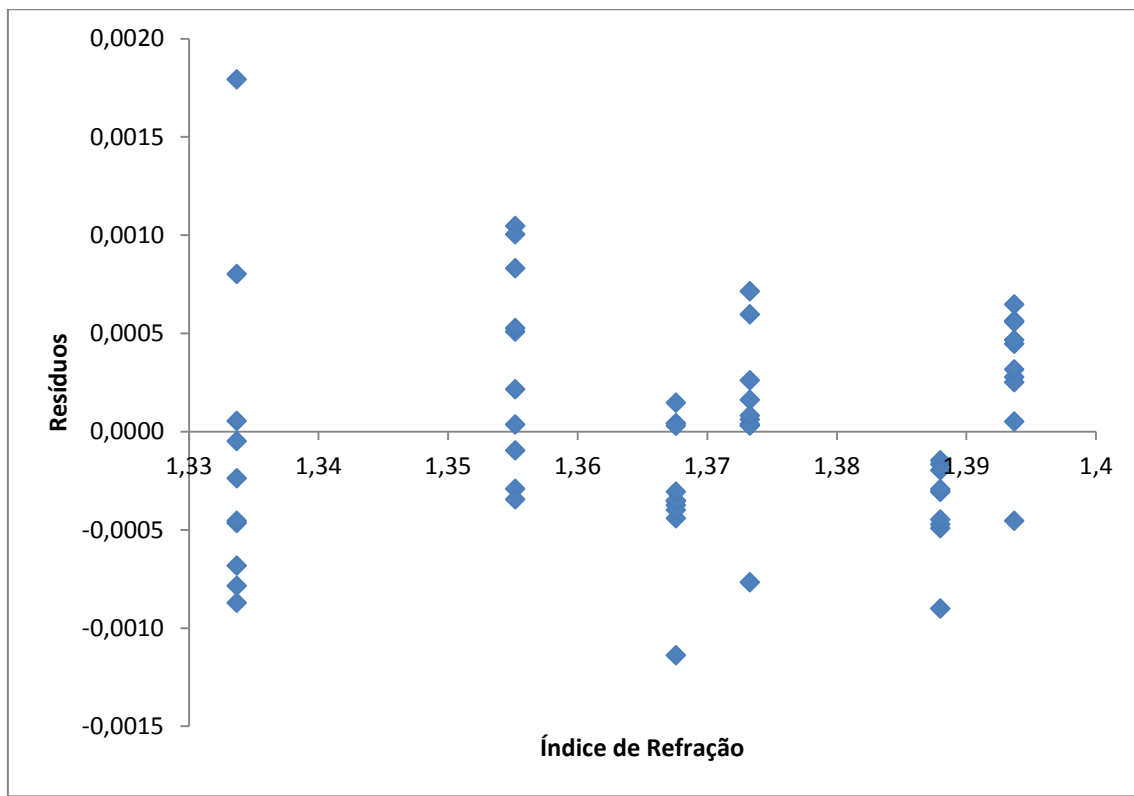


Figura B.50: Resíduos dos índices de refração do sensor 5 da fibra de 1 mm sem casca.

**B.10 Resíduos dos índices de refração dos sensores de fibra de 1 mm com casca sem taper.**



**Figura B.51: Resíduos dos índices de refração do sensor 1 da fibra de 1 mm com casca sem taper.**

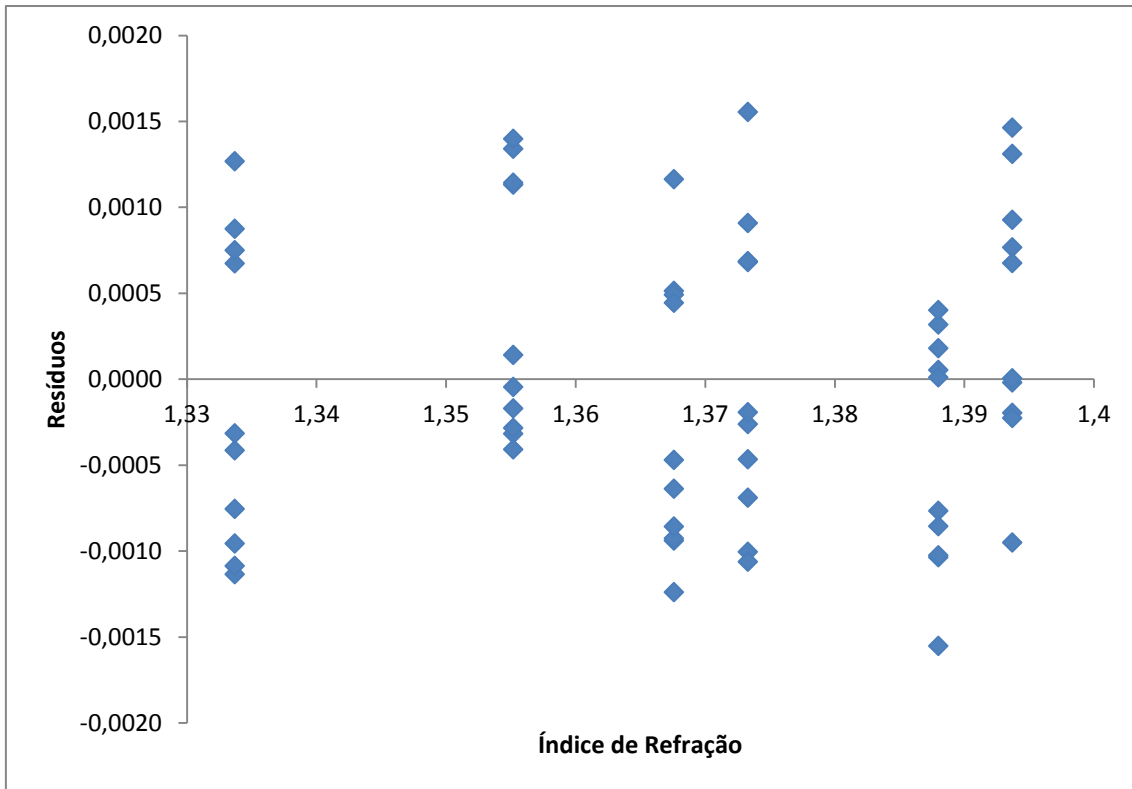


Figura B.52: Resíduos dos índices de refração do sensor 2 da fibra de 1 mm com casca sem taper.

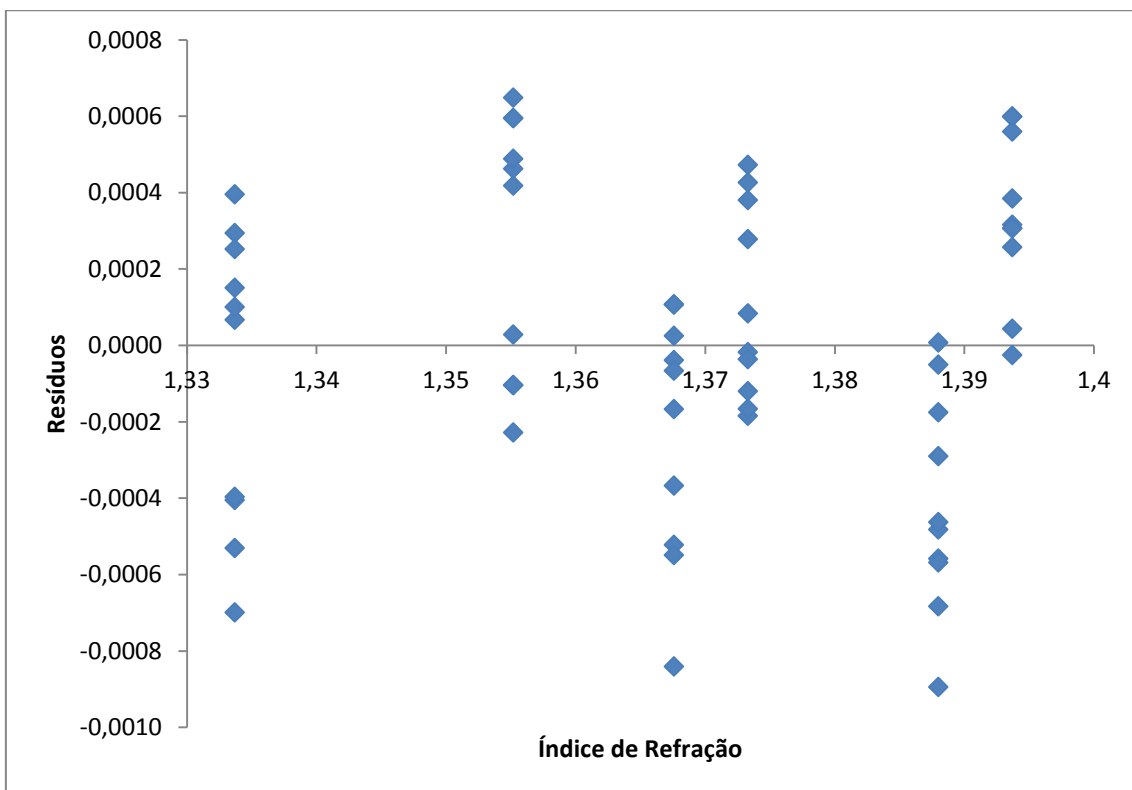


Figura B.53: Resíduos dos índices de refração do sensor 3 da fibra de 1 mm com casca sem taper.

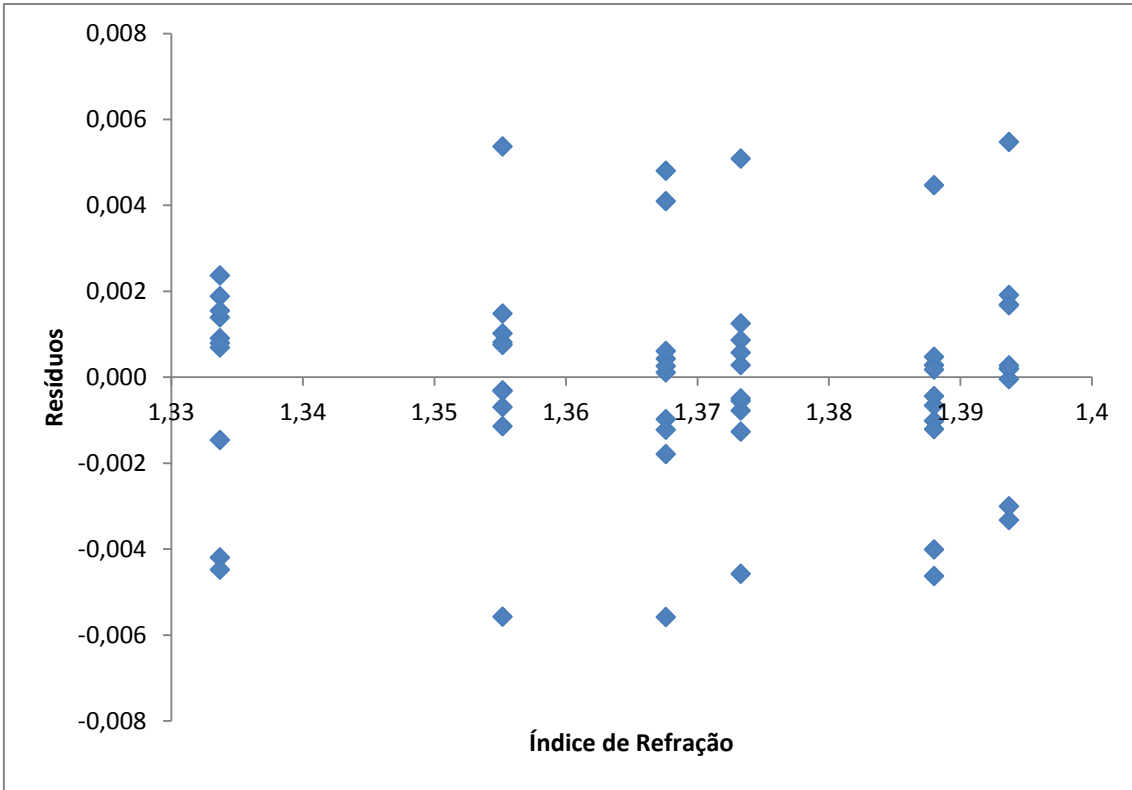


Figura B.54: Resíduos dos índices de refração do sensor 4 da fibra de 1 mm com casca sem taper.

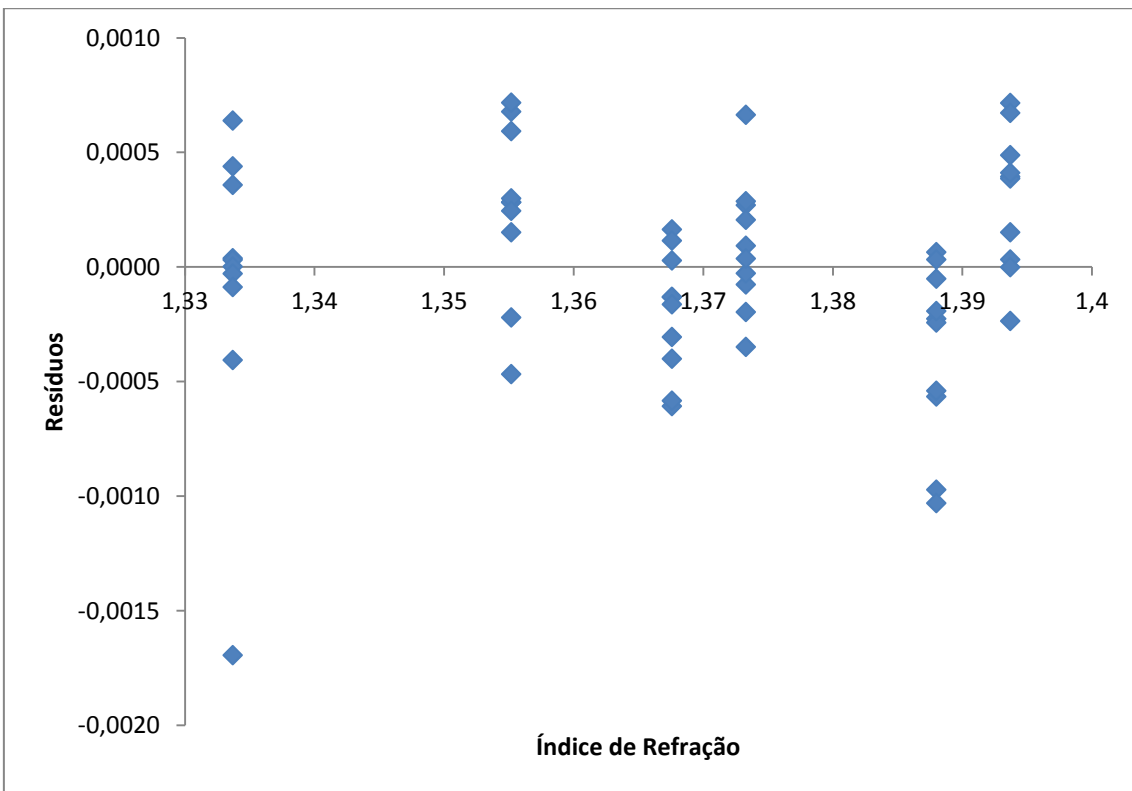


Figura B.55: Resíduos dos índices de refração do sensor 5 da fibra de 1 mm com casca sem taper.

### B.11 Resíduos dos índices de refração dos sensores de fibra de 0,45 mm sem casca.

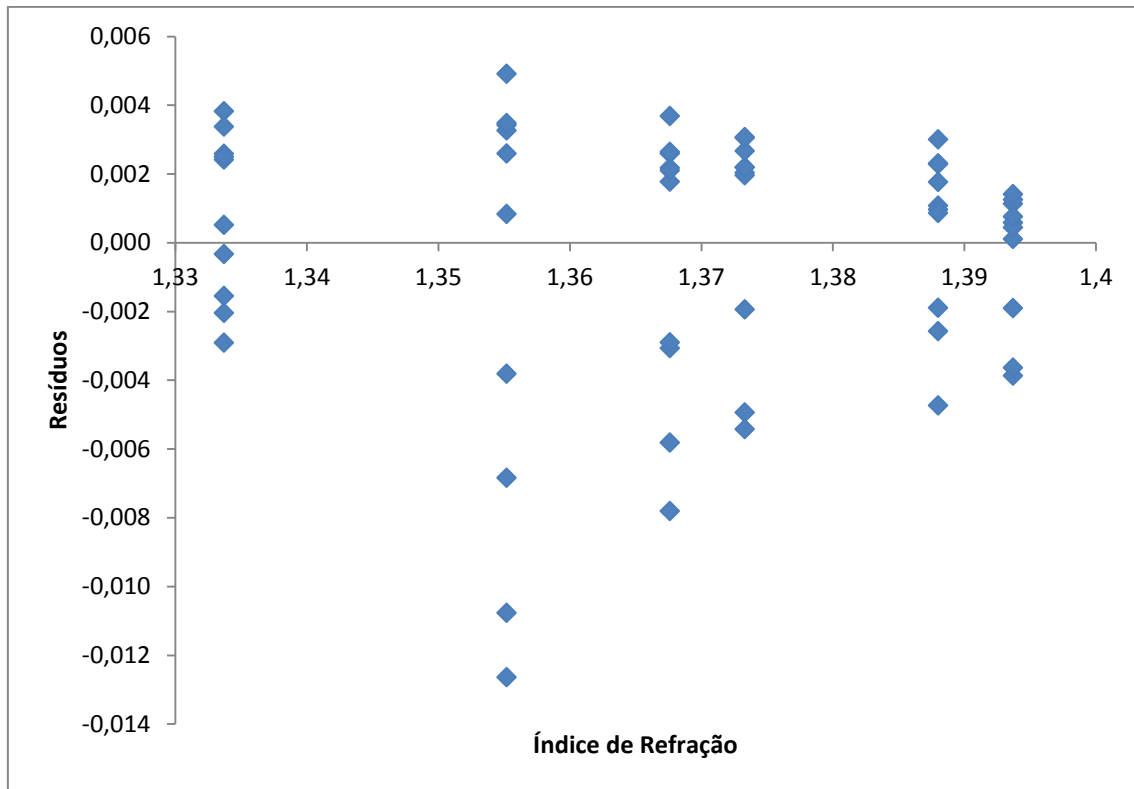


Figura B.56: Resíduos dos índices de refração do sensor 1 da fibra de 0,45 mm sem casca.

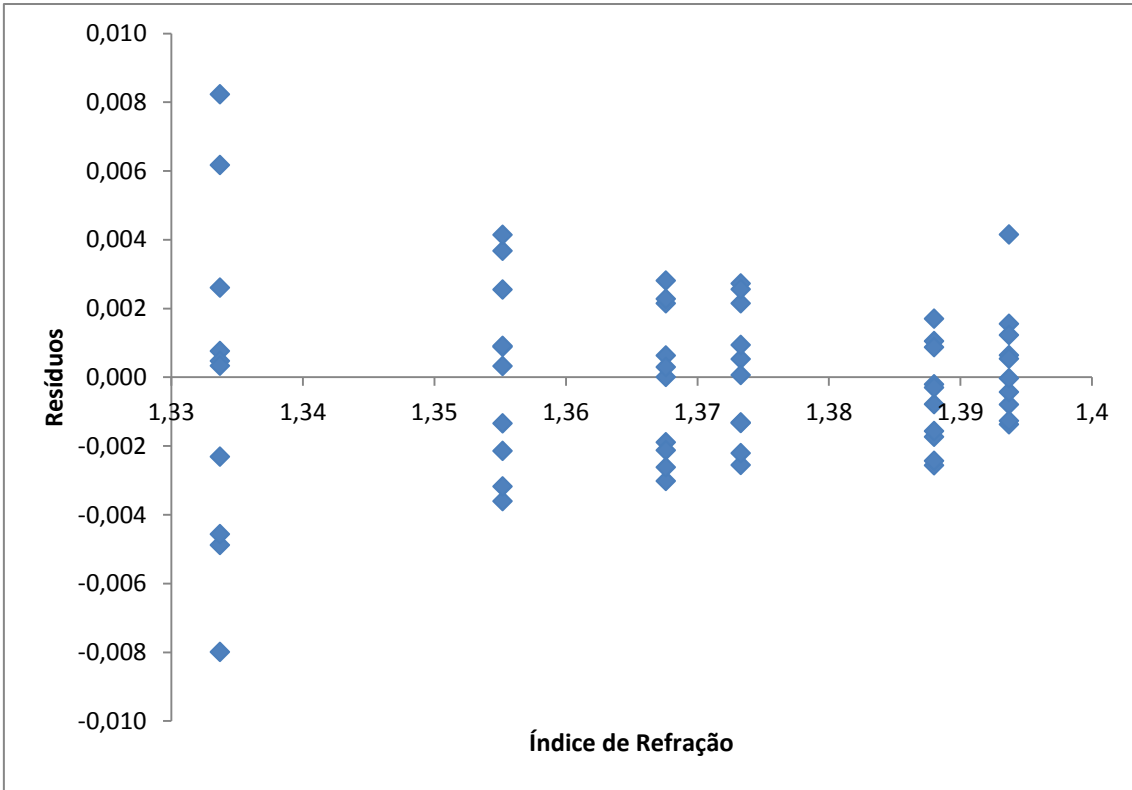


Figura B.57: Resíduos dos índices de refração do sensor 2 da fibra de 0,45 mm sem casca.

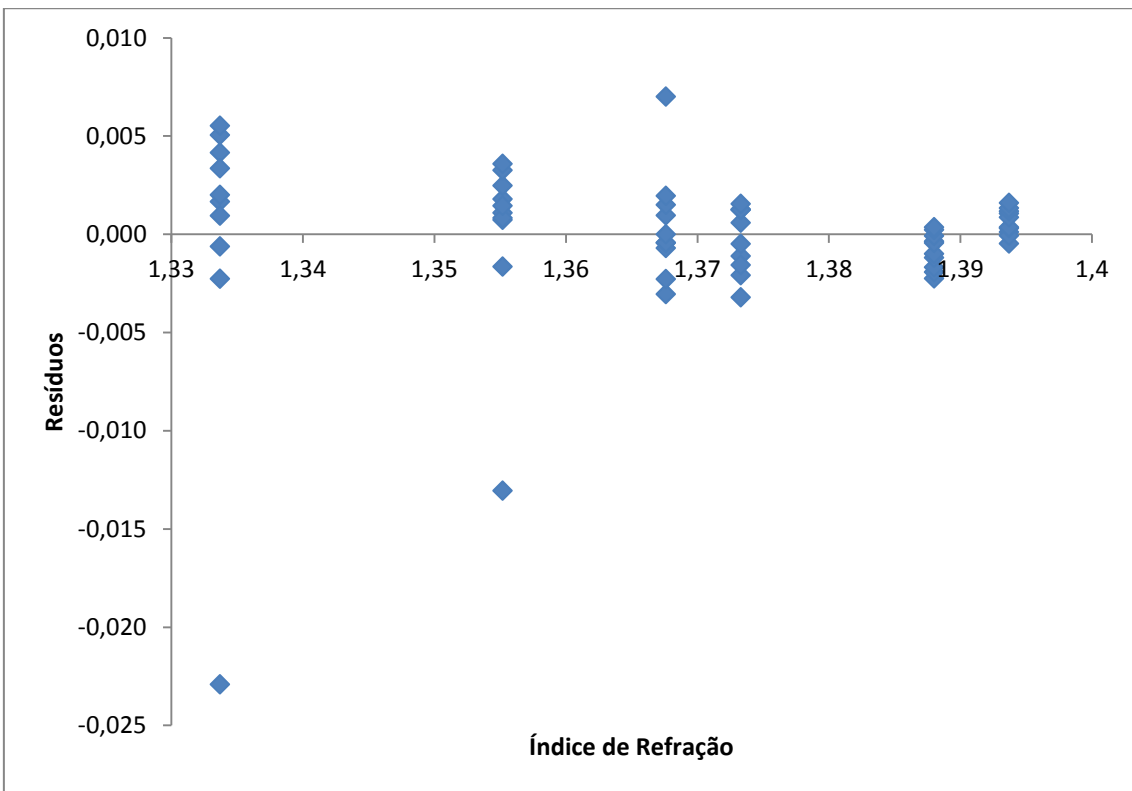


Figura B.58: Resíduos dos índices de refração do sensor 3 da fibra de 0,45 mm sem casca.



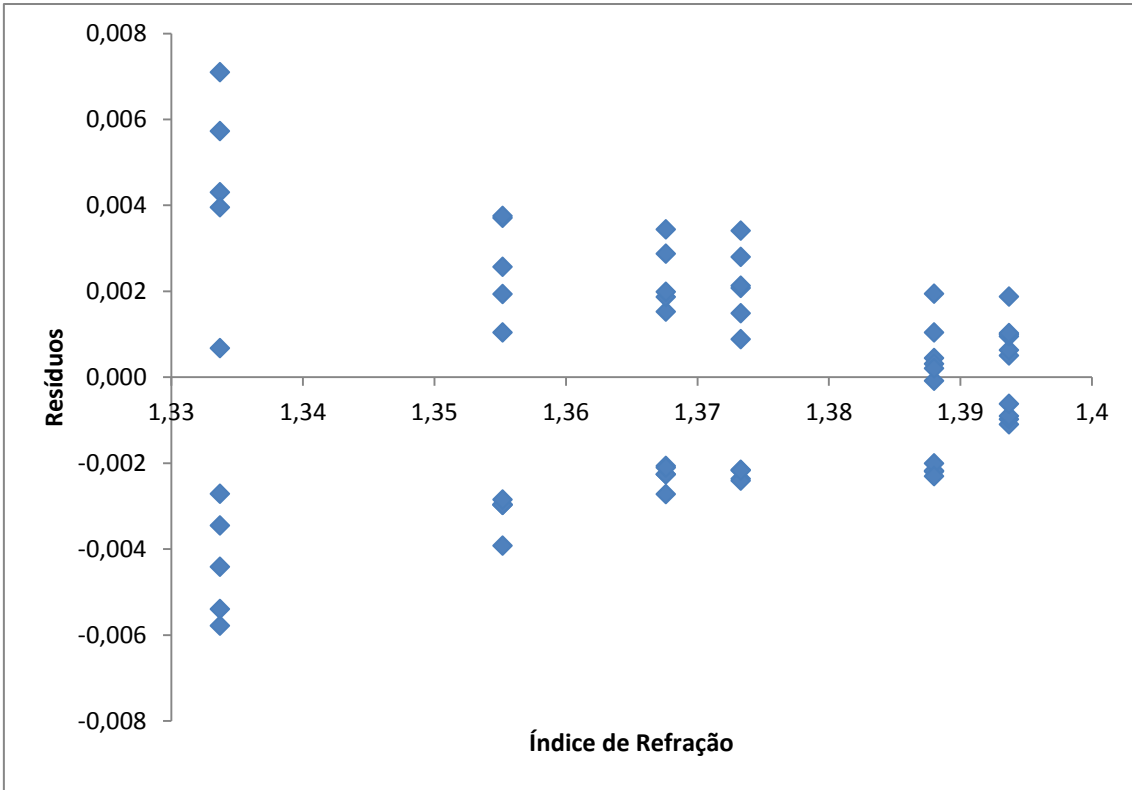


Figura B.59: Resíduos dos índices de refração do sensor 4 da fibra de 0,45 mm sem casca.

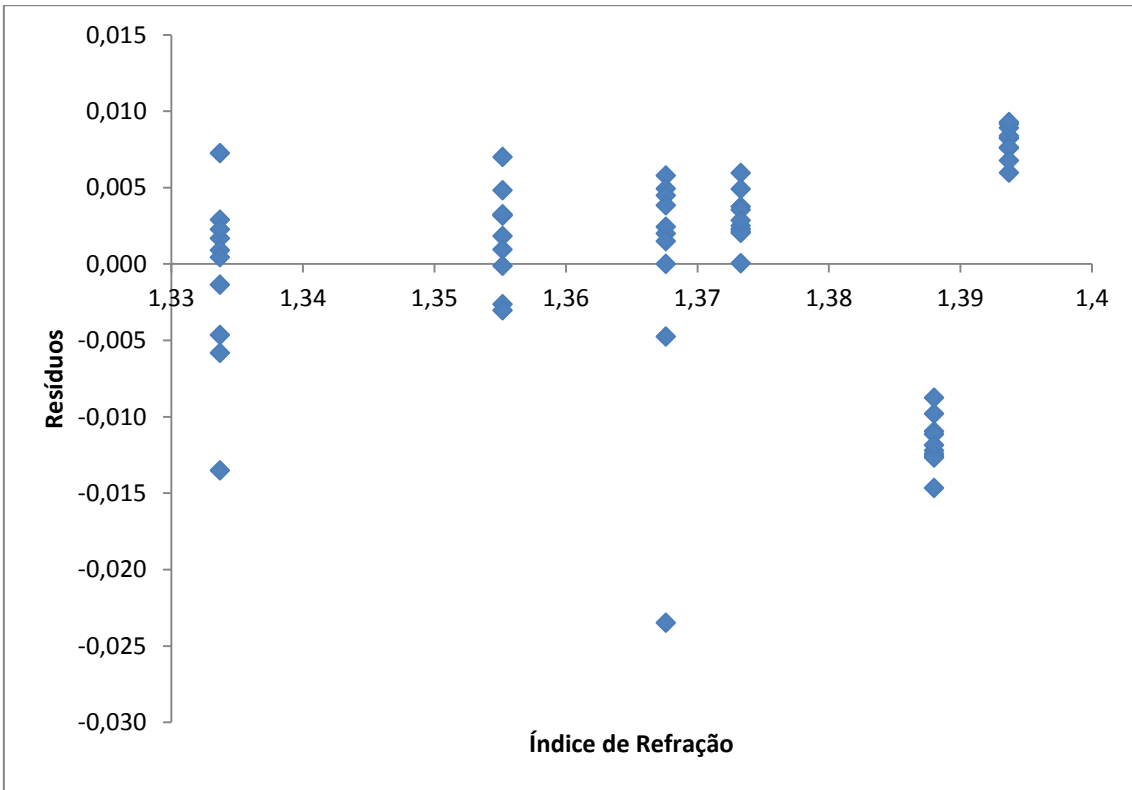


Figura B.60: Resíduos dos índices de refração do sensor 5 da fibra de 0,45 mm sem casca.

# Anexo C

## Artigos publicados em congressos

C. S. B. Allil, M. M. Werneck, J. L. da Silva-Neto, M. A. L. Miguel, **D. M. C. Rodrigues**, G.L.Wandermur and D. C. Rambauské, "Escherichia coli biosensors for environmental, food industry and biological warfare agent detection", Paper 8722-27, SPIE Defense, Security and Sensing (DSS) 2013 Session 6: Physical and Chemical Sensors II, Baltimore Convention Center, Baltimore, Maryland, United States, 29 April - 3 May 2013.

Werneck, M. M., Wandermur, G. L. , **Rodrigues, D. M. C.** , Nazaré, F. B. V. , Neto, J. L. S. , Carvalho, C. C. , Miguel, M. A. L. , “ Desenvolvimento de um Biosensor para Detecção de Microrganismos de Interesse em água e no Ambiente”, 26º Congresso Brasileiro de Microbiologia, Foz do Iguaçu, 02 à 06 de Outubro de 2011.

M. M. Werneck, R. C. Allil, **D. M. C. Rodrigues**, C. M. B. Cordeiro, M. A. Miguel, F. V. Nazaré, G. L. Wandermur and D. C. Rambauské, “LPG and Taper Based Fiber-Optic Sensor for Index of Refraction Measurements in Biosensor Applications” Proceedings of the 20th International Conference on Plastic Optical Fibers - POF 2011, pp. 545-550, Bilbao, Spain, 14th to 16th September, 2011.