**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

FELIPE BUENO HERNANDEZ

Sensor de força utilizando *Fiber taper*

SÃO CARLOS

2016

FELIPE BUENO HERNANDEZ

Sensor de força utilizando *Fiber taper*

Dissertação de Mestrado à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

**Área de Concentração:
Dinâmica de Máquinas e Sistemas**

**Orientador:
Prof. Dr. Glauco Augusto de Paula Caurin**

ESTE EXEMPLAR TRATA-SE DA
VERSÃO CORRIGIDA.
A VERSÃO ORIGINAL ENCONTRA-SE
DISPONÍVEL JUNTO AO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
MECÂNICA DA EESC-USP.

SÃO CARLOS

2016

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

H557s Hernandez, Felipe Bueno
Sensor de força utilizando fiber taper / Felipe
Bueno Hernandez; orientador Glauco Augusto de Paula
Caurin. São Carlos, 2016.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica e Área de Concentração em
Dinâmica de Máquinas e Sistemas -- Escola de Engenharia
de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2016.

1. Fiber taper. 2. Sensor de força. 3. Onda
evanescente. 4. Reflexão total interna frustrada. 5.
Sensor de fibra óptica. I. Título.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos que em mim acreditaram, à minha família, principalmente meus pais, minha sobrinha querida e ao meu avô.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a todas as pessoas que me apoiaram na minha batalha para alcançar essa conquista seja direta ou indiretamente.

Aos meus queridos amigos Danilo Velez, Cindy Nakashima e Beatriz Sassake, não consigo expressar com palavras o quanto a companhia de vocês foi importante para que eu pudesse realizasse esse trabalho, obrigado.

Tatiana Mayumi e Luana Alonso, agradeço de coração por tirarem minhas dúvidas sobre a fisiologia do corpo humano.

Luana Stanghanini, peço desculpas mais uma vez por te derrubar no meio do palquinho e agradeço pelos nossos papos e saídas.

Emília Pereira e Aline Stukart, obrigado por me ouvir e rirem das minhas piadas e por não terem desistido de mim.

Aline Campaner, eu agradeço pelo carinho e ajuda quando estive na corda bamba e precisei de força e coragem para seguir em frente.

Drieli Gobbi, obrigado pelos ótimos momentos que passamos juntos, e quero que saiba que sem você eu não teria sobrevivido nem ao início da batalha.

Tiffany Hikaru, obrigado por me acalmar, me ajudar, e me ouvir (e muito) quando eu estava totalmente perdido.

Agradeço ao Felipe Rendeiro por sempre saber como proceder e me ajudar.

Gostaria de agradecer o amparo do pessoal do Laboratório de Apoio Tecnológico (LAT): André Cruz, Daniel Chianfrone, Elizeu Ribeiro, Guilherme Ferraz, Javier Jurado, Jefferson Tinta, Madison Pott, Paulo Estevão, Priscilla Menezes, Thiago Balan e do Laboratório de Instrumentação Eletrônica para Óptica (LIEPO): Rodrigo Duarte, João Marcelo Pereira, Guilherme Chaves, Carlos Barros, Richard Mascarin, Caio Bueno e Marcos Miotti.

Agradeço também aos colegas: Leandro Serillo, Ramon Teixeira, Clóvis Grecco, Ângelo Govone e todos os colegas do grupo de óptica.

Gostaria de agradecer a Dra Érica Panzani por me ajudar no início da minha jornada e a cultivar iniciativa, e a Dra Gabriela Bagnato por me ajudar na reta final da minha jornada e a mudar minha maneira de ver as coisas.

Agradeço a Escola de Engenharia de São Carlos e ao Instituto de Física de São Carlos pelo acolhimento.

Ao Prof Dr. Glauco Caurin, agradeço pela oportunidade e por me guiar.

Aos Prof Dr. Daniel Varela e Prof Dr. Frederico Nunes agradeço por compartilharem conhecimentos sobre esse assunto misterioso chamado “Eletromagnetismo”.

Agradeço também ao Prof Dr. Vanderlei Salvador Bagnato pois foi o meu ingresso no LAT e a estrutura por ele criada que fizeram com que fosse possível que eu desenvolvesse esse trabalho.

Gostaria de agradecer à família Egami, Giovanna Miyuki, Giulia Ayumi, Sandra Mayumi e principalmente à Edna Emiko, pois no momento mais crítico, as caminhadas, sorvetes e açaís me fizeram respirar novamente.

E finalmente, agradeço a toda minha família, meu pai Hipólito, minha mãe Marisa, meus irmãos Fernando e Rafael, minha cunhada Débora e minha querida sobrinha Júlia.

Em último, porém não menos importante agradeço a Deus e a Nossa Senhora de Aparecida.

Muito obrigado a todos vocês!

EPÍGRAFE

“Imagination is more important than knowledge.”
(Albert Einstein)

RESUMO

HERNANDEZ, F. B. **Sensor de força utilizando *Fiber taper***. 2016. 126p. Dissertação (Mestrado em ciências) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil, 2016.

Este trabalho teve por objetivo desenvolver e caracterizar um sensor de força utilizando uma fibra óptica modificada pelo processo conhecido como *Fiber tapering*. A fibra quando modificada deixa exposto o campo evanescente, o que a torna sensível a influências externas, e a luz guiada na fibra pode vir a sofrer reflexão interna total frustrada ao entrar em contato com materiais. Ao envolver a região modificada por um material elastomérico, a área de contato e consequentemente a atenuação torna-se uma função da intensidade da força aplicada, possibilitando então relacionar a força a atenuação da luz. Baseando-se nesse efeito, foi criado um sensor de dimensões reduzidas, de rápida resposta, linear, altamente sensível e de boa repetibilidade. Foi criado também um circuito eletrônico utilizando amplificadores operacionais para a aquisição e processamento do sinal proveniente da fibra e selecionado um sensor comercial comum para a realização de experimentos e comparações. Ambos os sensores foram posicionados sobre uma balança de precisão e submetidos a diversos esforços obtendo-se dados sobre a resposta estática. Em seguida utilizando um *shaker* eletrodinâmico foram medidos os tempos de resposta a uma entrada degrau, e realizando esforços repetitivos foram analisados os desvios das medidas lidas pelos sensores.

Palavras-chave: *Fiber taper*. Sensor de força. Onda evanescente. Reflexão interna total frustrada. Sensor de fibra óptica.

ABSTRACT

HERNANDEZ, F. B. **Fiber taper based force sensor**. 2016. 126p. Dissertation (Master of Science) – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, São Carlos, SP, Brazil, 2016.

The aim of this research was to develop and characterize a force sensor using a modified optical fiber by a process known as Fiber tapering. The modified fiber leaves the evanescent field exposed and prone to external influences and the guided light may suffer frustration of total internal reflection upon contact with materials. When covering the modified fiber section with an elastomeric material, the contact area and therefore the attenuation becomes a function of the applied pressure, making it possible to relate force to attenuation in light intensity. Based on this effect, a small sensor was created, having a quick response time, with high linearity, high sensitivity and good repeatability. Along with the sensor, an electronic circuit using operational amplifiers was designed for acquisition and processing of the signal obtained from the optical fiber. In addition, in order to perform experiments and comparisons, a standard force sensor was chosen. Both sensors were placed over a precision weighing scale and had different intensities of force applied on them, and after that, data regarding static measurements was gathered. The response time was obtained using an electrodynamic shaker and applying a step input. Furthermore, data was gathered about the deviations on the measurements by performing a repetitive set of compressions.

Keywords: Fiber taper. Force sensor. Evanescent wave. Frustrated total internal reflection. Optical fiber sensor.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1: Diagrama de controle com malha fechada e sensor	6
Figura 2-2: Tipos de adaptação dos mecanorreceptores	10
Figura 2-3: Método da discriminação entre dois pontos.....	11
Figura 2-4: Matriz de elementos táteis.....	12
Figura 2-5: Porcentagens de pele da palma da mão humana	13
Figura 2-6: Ilustração histerese.....	14
Figura 2-7: Curva monotônica e não monotônica.....	15
Figura 2-8: Sensibilidade.....	16
Figura 2-9: Faixa de operação.....	17
Figura 2-10: Tempo de resposta.....	17
Figura 2-11: Onda eletromagnética	18
Figura 2-12: a) Onda não polarizada, b) Onda polarizada linearmente	18
Figura 2-13: Polarização perpendicular e paralela.....	19
Figura 2-14: Refração e reflexão de uma onda eletromagnética	19
Figura 2-15: Variação ângulo versus transmissão e reflexão	20
Figura 2-16: Influência do ângulo na reflexão interna total	21
Figura 2-17: Representação das reflexões internas totais em uma fibra óptica	22
Figura 2-18: Relação entre diâmetros da fibra monomodo e multimodo.....	22
Figura 2-19: Angulação de reflexão dos modos na fibra	23
Figura 2-20: Distribuição dos campos elétricos dos modos TE na fibra	24
Figura 2-21: Distribuição de potência dos modos	24
Figura 2-22: Efeito da curvatura no guia de onda	25
Figura 2-23: Transições de um <i>Fiber taper</i>	26
Figura 2-24: Relação do resultado do <i>fiber tapering</i> em diferentes diâmetros de núcleos.....	27
Figura 2-25: Refração e reflexão de um feixe	28
Figura 2-26: Representação das ondas evanescentes	30
Figura 2-27: Reflexão interna total frustrada.....	30
Figura 2-28: Experimento de reflexão interna total frustrada utilizando micro-ondas.....	31
Figura 2-29: Atenuação de uma onda ao passar por um meio absorvedor	33
Figura 2-30: Representação da configuração utilizada na espectroscopia de infravermelho	34
Figura 2-31: Representação do modelo de Gupta.....	35
Figura 2-32: Representação da variação da área de contato do silicone com o <i>Fiber taper</i>	35
Figura 2-33: Representação da pressão causando contato e frustração da reflexão interna total	36
Figura 2-34: Funcionamento simplificado do sensor	36
Figura 3-1: a) Foto de um <i>Strain gauge</i> , b) Foto de um <i>Force sensing resistor</i>	38
Figura 3-2: Vista explodida de um <i>Force sensing resistor</i>	39

Figura 3-3: Diminuição da resistência em função da força exercida num <i>Force sensing resistor</i>	39
Figura 3-4: Representação simbólica, pinagem e foto de um Amplificador operacional	40
Figura 3-5: Configuração inversora simplificada	40
Figura 3-6: Configuração não inversora simplificada	41
Figura 3-7: Configuração subtratora simplificada	42
Figura 3-8: Exemplo de correção do <i>offset</i>	42
Figura 3-9: Função de saída em relação ao capacitor e resistor	43
Figura 3-10: Resposta em frequência da função de transferência do capacitor e resistor	43
Figura 3-11: Representação da filtragem de 1ª ordem de um sinal	44
Figura 3-12: Representação da filtragem de 2ª ordem de um sinal	44
Figura 3-13: Circuito simplificado do <i>Force sensing resistor</i>	45
Figura 3-14: Foto de um fotodetector BPW34	46
Figura 3-15: Relação de irradiância versus corrente e comprimento de onda versus sensibilidade espectral relativa do fotodetector	46
Figura 3-16: Amplificador de transimpedância	47
Figura 3-17: Análise das correntes pela lei <i>Kirchoff</i>	47
Figura 3-18: Fonte simétrica regulada de $\pm 12V$	48
Figura 3-19: Estágio não inversor com divisor de tensão	48
Figura 3-20: Estágio inversor de transimpedância	49
Figura 3-21: Estágio final com filtro de 2ª ordem	49
Figura 3-22: Correção do <i>offset</i>	50
Figura 3-23: Chaveamento entre o <i>Force sensing resistor</i> e o <i>Fiber taper</i>	50
Figura 3-24: <i>Layout</i> da placa de circuito impresso (PCB)	51
Figura 3-25: Prototipadora ProtoMat LPKF S103	51
Figura 3-26: Circuito impresso e placa com componentes soldados.....	52
Figura 3-27: Caixa de blindagem do circuito e circuito montado.....	52
Figura 3-28: Entrada e saída de sinal.....	52
Figura 4-1: Lixas para fibra óptica	54
Figura 4-2: Representação da fibra não polida e polida	54
Figura 4-3: Suporte para realização do <i>fiber tapering</i>	55
Figura 4-4: Soprador térmico disponível no laboratório	55
Figura 4-5: Comparação da fibra comum com o <i>Fiber taper</i> pelo microscópio com magnificação de 4x	56
Figura 4-6: Demonstração da luz escapando na cintura do <i>Fiber taper</i>	57
Figura 4-7: Fibra fixada para experimentos	57
Figura 4-8: Medida da potência luminosa transmitida pela fibra sem interferências	58
Figura 4-9: Fibra óptica submersa em água	58
Figura 4-10: Medida da potência luminosa transmitida pela fibra submersa em água	58

Figura 4-11: Fibra curvada sem interferências.....	59
Figura 4-12: Medida da potência transmitida pela fibra curvada sem interferências	60
Figura 4-13: Fibra óptica curvada submersa em água	60
Figura 4-14: Medida da potência luminosa transmitida pela fibra curvada submersa em água	60
Figura 4-15: Dimensões do molde do sensor	61
Figura 4-16: Foto do molde usinado aberto	62
Figura 4-17: Foto do molde preenchido com silicone	62
Figura 4-18: Base do sensor vista por microscópio	62
Figura 4-19: Sensor de força utilizando <i>Fiber taper</i>	63
Figura 4-20: Vista isométrica do sensor obtido.....	63
Figura 4-21: Vista superior com o posicionamento do <i>taper</i> curvado	63
Figura 5-1: Montagem para medição de forças	66
Figura 5-2: Posicionamento do sensor	66
Figura 5-3: Placa de aquisição da National Instruments	67
Figura 5-4: <i>Layout</i> da função em LabVIEW	67
Figura 5-5: Foto das pontas utilizadas no experimento	68
Figura 5-6: Gráfico das tensões obtidas ajustando 100g para 10V utilizando o <i>Fiber taper</i>	69
Figura 5-7: Gráfico das tensões obtidas ajustando 1000g para 10V utilizando o <i>Fiber taper</i>	69
Figura 5-8: Gráfico das tensões obtidas ajustando 2000g para 10V utilizando o <i>Fiber taper</i>	70
Figura 5-9: Gráfico das tensões obtidas ajustando 3000g para 10V utilizando o <i>Fiber taper</i>	70
Figura 5-10: Gráfico das tensões obtidas ajustando 100g para 10V utilizando o FSR 402	71
Figura 5-11: Gráfico das tensões obtidas ajustando 1000g para 10V utilizando o FSR 402	71
Figura 5-12: Gráfico das tensões obtidas ajustando 2000g para 10V utilizando o FSR 402	72
Figura 5-13: Gráfico das tensões obtidas ajustando 3000g para 10V utilizando o FSR 402	72
Figura 5-14: Representação da obtenção das sensibilidades	73
Figura 5-15: Gráfico de tensões obtidas ajustando 30g para 10V utilizando o <i>Fiber taper</i>	74
Figura 5-16: <i>Mini shaker</i> modelo 4810.....	75
Figura 5-17: Funcionamento de um <i>shaker</i>	76
Figura 5-18: Alimentação do <i>mini shaker</i>	76
Figura 5-19: Gerador de funções Agilent 33500B	76
Figura 5-20: Amplificador de potência Type 2706.....	77
Figura 5-21: <i>Mini shaker</i> fixado invertido	77
Figura 5-22: Posicionamento do sensor.....	78
Figura 5-23: Medição do tempo de subida e descida do <i>Fiber taper</i>	78
Figura 5-24: Medição do tempo de subida e descida do FSR 402.....	79
Figura 5-25: Montagem para determinação da resposta do <i>mini shaker</i>	80
Figura 5-26: Medição do tempo de subida e descida do <i>mini shaker</i>	80
Figura 5-27: Conjuntos de pontos para cálculo do erro médio	82

Figura 5-28: Escolha de pontos abrangendo um período inteiro.....	83
Figura 5-29: Erros médio de cada conjunto de amostras e erros médios totais	83
Figura 6-1: Junção de todas as retas do sensor de <i>Fiber taper</i>.....	86
Figura 6-2: Junção de todas as curvas do FSR 402.....	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1: Classificação de mecanorreceptores - Adaptado de: [9].....	9
Tabela 2-2: Coeficientes de reflexão e transmissão dos tipos de polarização – Adaptado de: [20] ...	20
Tabela 4-1: Comparação das atenuações entre a configuração comum e curvada	61
Tabela 5-1: Valores de sensibilidade determinados para as medições do <i>Fiber taper</i>	73
Tabela 5-2: Tabela das sensibilidades determinadas para posições distintas das medições do <i>FSR</i> .	73
Tabela 5-3: Tabela de forças de ativação e estabilidade do <i>FSR 402</i>	75
Tabela 5-4: Medição do tempo de subida e descida do <i>Fiber taper</i>	79
Tabela 5-5: Medição do tempo de subida e descida do <i>FSR 402</i>	79
Tabela 5-6: Medição do tempo de subida e descida do <i>mini shaker</i>	81
Tabela 5-7: Cálculo dos tempos de resposta	81
Tabela 5-8: Erros médios do <i>Fiber taper</i> e do <i>Force sensing resistor</i>	84
Tabela 6-1: Valores de sensibilidade determinados para as medições do <i>Fiber taper</i>	87
Tabela 6-2: Valores de sensibilidade determinados para posições distintas das medições do <i>FSR 402</i>	87
Tabela 6-3: Erros médios do <i>Fiber taper</i> e do <i>Force sensing resistor</i>	88

LISTA DE ABREVIACES E SIGLAS

IFSC-USP	Instituto de física de São Carlos - Universidade de são Paulo
LAT	Laboratório de apoio tecnológico
ADCs	<i>Analog-to-digital converters</i> - Conversores analógico-digitais
TM	Polarização transversa magnética
TE	Polarização transversa elétrica
SiO ₂	Dióxido de silício
PMMA	Polimetil-metacrilato
FTIR	<i>Frustrated total internal reflection</i> - Reflexão interna total frustrada
FSR	<i>Force sensing resistor</i> - Resistor sensível  força
AmpOps	Amplificadores operacionais
DC	<i>Direct current</i> - Corrente contínua
PCB	<i>Printed circuit board</i> - Placa de circuito impresso
LIEPO	Laboratório de Instrumentação Eletrônica para ptica
BNC	Bayonet Neill Concelman
PTFE	Politetrafluoretileno
ABS	Acrilonitrila butadieno estireno
LabDin	Laboratório de Dinâmica
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
PVC	Policloreto de polivinila

LISTA DE SÍMBOLOS

$\vec{E}$	Vetor campo elétrico
$\vec{H}$	Vetor campo magnético
c	Velocidade de propagação de uma onda eletromagnética no espaço livre
ε_0	Permissividade do vácuo
μ_0	Permeabilidade do vácuo
f	Frequência de oscilação
λ	Comprimento de onda
n	Índice de refração real
θ_i	Ângulo de incidência
θ_r	Ângulo de reflexão
θ_t	Ângulo de transmissão
r_p	Coefficiente de reflexão de uma onda polarizada paralelamente
r_s	Coefficiente de reflexão de uma onda polarizada perpendicularmente
t_p	Coefficiente de transmissão de uma onda polarizada paralelamente
t_s	Coefficiente de transmissão de uma onda polarizada perpendicularmente
V	Frequência normalizada
$r_{\text{núcleo}}$	Raio do núcleo
NA	Abertura numérica
$n_{\text{núcleo}}$	Índice de refração do núcleo
n_{casca}	Índice de refração da casca
Pot_{casca}	Potência óptica fluindo na casca
Pot_{total}	Potência óptica total na fibra
LP	Polarização linear
E_i	Campo elétrico incidente
E_r	Campo elétrico refletido
E_t	Campo elétrico transmitido
B_i	Campo magnético incidente
B_r	Campo magnético refletido
B_t	Campo magnético transmitido

$\vec{E}_t(r, t)$	Vetor campo elétrico transmitido
$\vec{E}_0$	Vetor campo elétrico inicial
$\vec{k}$	Vetor da onda
$\vec{r}$	Vetor posição
t	Tempo
ω	Velocidade angular
d_p	Profundidade de penetração
n^*	Índice de refração complexo
κ	Índice de refração imaginário (absorção + espalhamento)
P	Potência da luz após atravessar a região absorvedora
P_0	Potência antes de atravessar a região
γ	Coefficiente de absorção evanescente
L	Comprimento da região exposta à absorção
+VSS	Fonte de alimentação positiva
+V	Fonte de alimentação positiva
−VSS	Fonte de alimentação negativa
−V	Fonte de alimentação negativa
V_-	Entrada inversora
V_+	Entrada não inversora
V	Tensão
V_o	Tensão de saída
V_i	Tensão de entrada
R	Resistência
X_c	Reatância capacitiva
$V_{or}(S)$	Tensão no resistor no domínio da frequência
$V_i(S)$	Tensão de entrada no domínio da frequência
$V_{oc}(S)$	Tensão no capacitor no domínio da frequência
C	Capacitor
V_{out}	Tensão de saída
V_{ref}	Tensão de referência
I_D	Corrente do diodo
g	Força em gramas

AV_{FSR}	Ganho do estágio do FSR
AV_{Photo}	Ganho do estágio do fotodetector
f_c	Frequência de corte
Δs	Sensibilidade
Δf	Variação de força
Δv	Variação de tensão
t_s	Tempo de subida

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	2
1.1	OBJETIVOS DO TRABALHO	3
1.2	ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA DO TRABALHO.....	3
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	6
2.1	SENSORES	6
2.2	CONSIDERAÇÕES.....	6
2.3	O QUE É O TATO?	7
2.4	CARACTERÍSTICAS FISIOLÓGICAS	8
2.5	MECANORRECEPTORES	9
2.6	IMPORTÂNCIA	10
2.7	MÃO HUMANA E A MÃO ARTIFICIAL	11
2.8	CARACTERÍSTICAS DOS SENSORES	16
2.9	LUZ	17
2.10	POLARIZAÇÃO DA LUZ	18
2.11	PROPAGAÇÃO EM DIFERENTES MEIOS	19
2.12	FIBRA ÓPTICA	22
2.13	<i>FIBER TAPERING</i>	26
2.14	<i>FIBER TAPERS</i>	26
2.15	APLICAÇÕES	27
2.16	ONDAS EVANESCENTES	28
2.17	REFLEXÃO INTERNA TOTAL FRUSTRADA (FTIR)	30
2.18	ATENUAÇÃO DA LUZ REFLETIDA TOTAL INTERNAMENTE	32
2.19	FUNCIONAMENTO DO SENSOR PROPOSTO	34
3	MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.1	COMPARAÇÃO	38
3.2	CONDICIONAMENTO DE SINAIS	40
3.3	FILTRAGEM DE RUÍDOS	43
3.1	CIRCUITO DO <i>FORCE SENSING RESISTOR</i>	45
3.2	CIRCUITO DO TRANSDUTOR DE LUZ.....	46
3.3	PROJETO DO DIAGRAMA ESQUEMÁTICO	48
3.4	PROJETO DA PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO (PCB).....	51
3.5	PROTOTIPAGEM E MONTAGEM.....	51
4	MONTAGEM DO SENSOR PROPOSTO	54

4.1	PREPARAÇÃO DA FIBRA	54
4.1	<i>FIBER TAPERING</i>	56
4.2	<i>FIBER TAPERING</i> CURVADO	59
4.1	CRIAÇÃO DO SENSOR.....	61
5	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	66
5.1	OBTENÇÃO DE DADOS E COMPARAÇÃO.....	66
5.2	SENSIBILIDADE	68
5.3	PROCEDIMENTO	68
5.4	AQUISIÇÕES COM O SENSOR <i>FIBER TAPER</i>	69
5.5	AQUISIÇÕES COM FSR 402 (INTERLINK ELECTRONICS)	71
5.6	LIMITE MÍNIMO E MÁXIMO DO <i>RANGE</i>	74
5.7	TEMPO DE RESPOSTA.....	75
5.8	CARACTERÍSTICAS DE HARMON (1982).....	81
6	CONCLUSÃO	86
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	88

1 INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

Em diversas áreas de estudo são necessários sensores que reproduzam um papel semelhante ao dos cinco sentidos nos seres vivos. Com o crescente interesse em sensores que forneçam informações sobre o contato físico, é possível observar sua necessidade em diversas áreas da engenharia, medicina e principalmente no encontro das duas onde se tem a reabilitação robótica, membros prostéticos entre outros.

Pela complexidade do tato, encontram-se inúmeros desafios na implementação de sensores de força, especialmente devido à dificuldade em empregar materiais e configurações que atendam aos requisitos necessários e forneçam as mesmas possibilidades de um sistema criado pela própria natureza. Mesmo havendo diversos tipos hoje em dia, tem-se em sua maioria sensores volumosos, caros e não duráveis.

Estudos recentes por Massaro et al. (2010) propõem um modelo de sensor óptico utilizando *Fiber taper* e o efeito de frustração da reflexão interna total causado pelo acoplamento eletromagnético entre a fibra e um material elastomérico composto por nanopartículas. Essa interferência produz então uma perturbação na transmissão da luz acoplada na fibra, o que possibilita estabelecer uma relação entre a intensidade da força exercida no sistema, causando compressão entre os materiais, e a diminuição na transmissão da luz, caracterizando então um método transdutor.

Essa proposta de sensor óptico traz as características relevantes comuns aos sensores de fibra, como imunidade à interferência eletromagnética, alta sensibilidade e resposta rápida, porém seu princípio de funcionamento se destaca quando comparado aos outros tipos de sensores ópticos de força pelo fato de também possuir dimensões reduzidas.

Embora o sensor proposto no artigo base deste trabalho seja uma inovação, dificuldades são encontradas devido à complexidade de se desenvolver um material elastomérico nanocomposto e também ao alto custo de criação dado que as nanopartículas são do material ouro.

O ouro foi escolhido para a criação das nanopartículas pois é inerte e não sofre ação do tempo, porém é possível estudar o emprego de outros metais e também até mesmo a eliminação das nanopartículas modificando o princípio de funcionamento do sensor, mas ainda com base nos mesmos princípios físicos.

Para tanto, baseando-se nessa ideia, surge a oportunidade de uma aprimoração e simplificação do sensor proposto no artigo que mantenha suas qualidades, objetivo principal do desenvolvimento desse trabalho.

1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO

Os objetivos do trabalho foram os seguintes:

- Estudar as interações entre luz guiada por uma fibra óptica modificada;
- Criação e desenvolvimento de circuitos eletrônicos para medição;
- Desenvolvimento de um sensor força distinto, com características relevantes e inovadoras e a verificação de suas propriedades;

Para atingir esses objetivos foi realizada um estudo sobre circuitos eletrônicos de tratamento de sinais, conceitos de eletromagnetismo e fibras ópticas, modificações nas fibras, aquisição de dados e programação em LabVIEW.

1.2 ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho de mestrado foi realizado no período de agosto de 2013 a dezembro de 2015, tendo sido desenvolvido no Instituto de Física de São Carlos - Universidade de São Paulo (IFSC – USP), no Grupo de Óptica no Laboratório de Apoio Tecnológico (LAT).

Este trabalho se divide em seis capítulos:

- I. **O capítulo 1** apresenta a motivação, objetivos e estrutura do trabalho;
- II. **O capítulo 2** apresenta um embasamento teórico onde é feita uma introdução dos principais tópicos do trabalho;

- III. **O capítulo 3** discute o desenvolvimento dos circuitos eletrônicos para medição;
- IV. **O capítulo 4** apresenta a implementação do sensor proposto;
- V. **O capítulo 5** apresenta resultados experimentais e dados sobre as qualidades do sensor;
- VI. **O capítulo 6** apresenta as conclusões e perspectivas para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 SENSORES

No contexto de sistemas robóticos e automação, torna-se necessária uma coleta de dados para que ocorra um controle eficiente da planta ou para que o sistema se comporte de forma que não provoque danos ao que o rodeia ou seja danificado. Pode-se buscar essa melhoria nos sistemas fazendo uso de sensores, possibilitando então o fechamento de uma malha de controle como demonstrado na figura 2-1.

Figura 2-1: Diagrama de controle com malha fechada e sensor

Adaptado de: <http://nasa.olin.edu/projects/2010/tec/workings/basicFeedback.png> - Acesso em: 30/11/2015

Um problema comumente encontrado na área de robótica e reabilitação é a complexidade em se obter dados confiáveis sobre as interações com objetos, seja em uma simples preensão (ato de agarrar ou segurar objetos) ou até mesmo no *feedback* do estímulo mecânico em uma prótese de membros.

Diversos tipos de sensores de força tem sido estudados há décadas, resultando em novas concepções. Na literatura é possível encontrar sensores baseados em diferentes tipos de princípios físicos, incluindo, resistores sensíveis à força [2], sensores piezoelétricos [3], sensores capacitivos [4] e ópticos [5][6], cada tipo possuindo suas vantagens e desvantagens, o que limita seu uso apenas para situações específicas.

2.2 CONSIDERAÇÕES

Harmon (1982) realizou uma pesquisa enviando um questionário a 55 profissionais nas áreas acadêmica, industrial e governamental, interessado em opiniões

sobre como deveriam ser as características de um sensor tátil, suas especificações, aplicações, obstáculos e até mesmo custos.

Como resultado de sua pesquisa [7] foram obtidos os seguintes requisitos:

- I. A superfície do sensor deve ser maleável e durável;
- II. A resolução espacial deve ser de 1 – 2 mm;
- III. Uma matriz contendo entre 50 – 200 elementos tácteis é aceitável (e.g., 5 X 10, 10 X 20);
- IV. O sensor deve ser capaz de detectar até mesmo 5g (0.049 N), idealmente 1 g (0.0098 N);
- V. Uma resolução de 1000:1 é satisfatória;
- VI. O Sensor deve ser estável, com boa repetibilidade e sem histerese;
- VII. A resposta deve ser monotônica, embora não necessariamente linear;
- VIII. A frequência de aquisição de dados deve ser no mínimo de 100 Hz.

Para justificar a complexidade e a análise que gerou essa lista é necessário entender como o tato funciona, por isso é fundamental conhecer os conceitos da fisiologia do ser humano, que é conceituada a seguir.

2.3 O QUE É O TATO?

Conhecido popularmente como tato, uma das cinco modalidades sensoriais do corpo humano, é o sentido responsável pela percepção de sensações corporais. O tato pertence ao sistema somatossensorial, onde receptores que possuímos no corpo humano fazem a transdução de estímulos mecânicos em repostas neurais [8].

Por ser capaz de obter tanto as sensações causadas pelo estímulo da superfície quanto da parte interna do corpo, esse complexo sistema é o responsável pela interação e reconhecimento do ambiente ao redor, obtendo *feedback* mecânico e as

características de objetos e suas composições materiais, como: formato, tamanho, peso e textura.

2.4 CARACTERÍSTICAS FISIOLÓGICAS

O sistema somatossensorial possui dois grupos principais, o grupo dos sistemas responsáveis pela detecção de estímulos mecânicos, composto por:

- Sistema Proprioceptivo ou Cinestésico, responsável pela posição e orientação no espaço e movimento de cada parte do corpo;
- Sensibilidade vibratória ou Palestesia, responsável pela capacidade de reconhecer estímulos vibratórios;
- Tato Epicrítico ou Tato fino, cuja resposta precisa e rápida, é responsável pela capacidade de reconhecer objetos e permite a possibilidade de discriminação entre dois pontos;
- Tato Protopático ou Tato grosso, cuja resposta é grosseira, lenta e imprecisa no reconhecimento da localização da fonte de estímulo, é específico para *feedbacks* de força e pressão.

E o grupo onde os sensores são responsáveis pela detecção de estímulos térmicos e dolorosos, os quais são obtidos a partir das terminações nervosas livres:

- Sistema Termoceptivo, responsável pela percepção de calor ou frio;
- Sistema Nociceptivo, responsável pela percepção de estímulos nocivos ao tecido.

2.5 MECANORRECEPTORES

Os sensores responsáveis pelo reconhecimento de estímulos mecânicos são chamados de mecanorreceptores e sua classificação é feita em função de sua velocidade de adaptação a estímulos provenientes do ambiente e suas respectivas funções.

No corpo humano, há entre outros, os seguintes mecanorreceptores como pode ser visto na tabela 2-1.

Tabela 2-1: Classificação de mecanorreceptores - Adaptado de: [9]

Mecanorreceptor	Localização	Função	Velocidade de adaptação
Terminações nervosas livres	Em toda a pele	Dor, temperatura e contato bruto	Lenta
Corpúsculo de Meissner	Pele sem pelos (glabra)	Toque e pressão dinâmicos	Rápida
Corpúsculo de Pacini	Tecido subcutâneo, membranas interósseas e vísceras	Pressão profunda e vibrações dinâmicas	Rápida
Disco de Merkel	Toda a pele e folículos capilares	Toque e pressão estáticos	Lenta
Corpúsculo de Ruffini	Toda a pele	Estiramento da pele	Lenta
Fuso muscular	Músculos	Comprimento do músculo	Ambas
Órgão tendinoso de Golgi	Tendões	Tensão muscular	Velocidade de adaptação
Receptores articulares	Articulações	Posição das articulações	Rápida

Quando um mecanorreceptor recebe um estímulo, há a geração de potenciais de ação que transmitem informações sensoriais para o sistema nervoso central. Dependendo do tipo de mecanorreceptor, há diferentes modos de transmissão de informações: caso sua especialização seja variações instantâneas (adaptação rápida) tem-se impulsos nervosos apenas momentaneamente; já no caso de uma especialização em estímulos contínuos (adaptação lenta), temos um trem de impulsos que com o tempo sofre uma diminuição gradual da frequência, até que haja uma acomodação total do mecanorreceptor e ele pare de responder ao estímulo como demonstrado na figura 2-2.

Figura 2-2: Tipos de adaptação dos mecanorreceptores

Adaptado de:

https://droualb.faculty.mjc.edu/Course%20Materials/Physiology%20101/Chapter%20Notes/Fall%202007/figure_10_03_labeled.jpg

- Acesso: 30/11/2015

Juntos, os receptores possibilitam aos seres humanos e animais identificar formatos e texturas, interagir com objetos, a locomoção e a detecção de situações potencialmente perigosas que causarão danos ao corpo e a reação a elas.

2.6 IMPORTÂNCIA

Para o ser humano, o tato e a visão, são as modalidades sensoriais mais importantes do corpo, e geralmente trabalham em conjunto para a realização de tarefas. Embora seja possível uma pessoa viver sem a visão, a perda total do *feedback* mecânico seria catastrófica se fosse possível, pois a falta da principal maneira de interação física com objetos resultaria em uma dificuldade até em manuseá-los [10].

Explorando mais a fundo é possível encontrar indícios de como seria o resultado da ausência do tato no corpo humano. Há casos na medicina de doenças e condições em que pacientes tem insensibilidade às sensações físicas nocivas do corpo humano (termoceção e nociceção), trazendo danos aos membros e pele causados por queimaduras e impactos que ocorrem sem que se tenha consciência imediata dos mesmos [11][12].

2.7 MÃO HUMANA E A MÃO ARTIFICIAL

Fazendo uma análise empregando todos os sistemas necessários para imitar uma mão humana em sua perfeição e utilizando dados de pesquisadores da área de fisiologia é possível chegar a conclusões e comentar sobre os itens presentes na lista apresentada anteriormente:

I. A superfície do sensor deve ser maleável e durável;

A princípio, é interessante que a superfície do sensor seja o mais próximo o possível da textura da pele humana, em outras palavras, seja viscoelástica, inerte e tenha uma vida longa, resistindo a um grande número de deformações tanto de compressão, como distensão e cisalhamento.

II. A resolução espacial deve ser de 1 – 2mm;

Descriminação de dois pontos (*two point discrimination*) é um método comumente utilizado para determinar a resolução espacial da sensibilidade tátil, esse método consiste em estimular a superfície da pele em dois ou mais pontos distintos para se obter a menor distância em que se é possível diferenciar um de dois estímulos separados como demonstrado na figura 2-3.

Figura 2-3: Método da discriminação entre dois pontos

Adaptado de:

<http://image.slidesharecdn.com/tousifroleofreceptors-111027044136-phpapp01/95/tousif-role-of-receptors-56-728.jpg?cb=1319691013> – Acesso: 30/11/2015

Na literatura [13] é possível determinar que a acuidade espacial possui limiares entre 2 – 4mm de distância entre dois pontos para as pontas dos dedos.

III. Uma matriz contendo entre 50 – 200 elementos tácteis é aceitável (e.g., 5 X 10, 10 X 20);

Supondo sensores de 4 mm² posicionados de modo que formem uma matriz podemos obter aproximadamente quantos sensores poderiam ser posicionados na superfície de um dedo como demonstrado na figura 2-4.

Figura 2-4: Matriz de elementos táteis

Adaptado de: http://jordangc.com/wp-content/uploads/2014/04/hand_size_diagram-264x300.jpg - Acesso: 30/11/2015

Utilizando estudos de Agnihotri (2006) sabe-se que o comprimento médio da mão de um homem possui 189 mm da base à ponta do dedo médio e a palma 84 mm de largura. É possível então estimar a área média de pele sem pelos (glabra) da mão utilizando a relação proposta por Johansson, R. S.; Vallbo, Å. B., (1979), apresentada na equação 2.1.

$$Y = 1,7 \times (L \times W) - 76[cm^2] \quad (2.1)$$

Os blocos individuais estão em proporções correspondentes às suas dimensões. Os números indicados são em porcentagem em relação à área total como demonstrado na figura 2-5.

Figura 2-5: Porcentagens de pele da palma da mão humana

Adaptado de: [15]

Assumindo que a área de pele sem pelos (glabra) na ponta do dedo indicador é de 4,7% do total na mão, obtêm-se uma quantidade de 228 sensores táteis na ponta do dedo.

- IV. O sensor deve ser capaz de detectar até mesmo 5g (0.049 N), idealmente 1 g (0.0098 N).

De acordo com Bell, J.; Bolanowski, S.; Holmes, M. H. (1994) sabe-se que o limiar da sensação tátil em média equivale a 0.055g nas pontas dos dedos e 0.158g nas palmas das mãos para os homens, e 0.032g e 0.019g para as mulheres respectivamente.

- V. Uma resolução de 1000:1 é satisfatória.

A resolução é o menor incremento que pode ser medido na saída de sinal do sensor, ou seja, uma quantização da força teria 1000 diferentes níveis. Não há estudos na literatura que definam resolução do tato humano.

- VI. O sensor deve ser estável, com boa repetibilidade e sem histerese.

Estabilidade e repetibilidade são fundamentais em um sensor, pois se suas medidas não são estáveis e de boa repetibilidade, seu uso de forma confiável se torna restringido. Já a histerese é a tendência de o sensor manter seu estado quando estimulado resultando em diferentes comportamentos entre uma entrada crescente e uma decrescente como demonstrado na figura 2-6.

Figura 2-6: Ilustração histerese

Adaptado de: http://2.bp.blogspot.com/_ZNZ7m9tKOBk/TTP1ptO2MvI/AAAAAAAAACA/6zxiknVUG5o/s1600/Hysteresis.jpg -

Acesso: 30/11/2015

A histerese em sensores de força é causada pela resposta do material à deformação exercida pela força externa. Como o princípio básico de funcionamento de muitos sensores é baseado em deformação, nunca será possível um retorno instantâneo ao repouso, portanto é seguro dizer que é impossível não haver histerese, consequentemente até certo grau histerese deve ser aceito, desde que não interfira de forma significativa nas medições.

VII. A resposta deve ser monotônica, embora não necessariamente linear.

Embora a linearidade não seja um fator crítico, é extremamente importante que o sensor tenha uma resposta monotônica para medições, isso garante que não haverá duas leituras para o mesmo estímulo como demonstrado na figura 2-7.

Figura 2-7: Curva monotônica e não monotônica

Adaptado de: <http://www.stats.org/wp-content/uploads/2015/11/Figure-2.png> - Acesso: 30/11/2015

VIII. A frequência de aquisição de dados deve ser no mínimo de 100 Hz.

O escritor e bioquímico americano Isaac Asimov em seu livro “Asimov explica”, ao responder uma pergunta sobre qual seria a velocidade do pensamento, utiliza estudos de Hermann Von Helmholtz em 1852 e chega à conclusão de que a velocidade de um impulso nervoso é de 100 m/s e que em 1/25 segundos um impulso nervoso pode ir e voltar de um ponto qualquer a outro do corpo humano.

Assumindo que apenas a ida seja de 1/50 segundos, tem-se uma transmissão de informação de 50 Hz e seguindo o teorema de *Nyquist* é plausível dizer que a frequência de amostragem deve ser de 100 Hz.

Em se tratando de frequência de aquisição, é seguro dizer que facilmente grande parte dos sistemas conversores de sinais analógicos em sinais digitais (ADCs) discretos ou presentes nos microcontroladores podem superar esse requisito.

Em se tratando de frequência e velocidade, é possível determinar pela literatura que a sensibilidade tátil dos seres humanos consegue detectar até vibrações de 1000 Hz [16], em outras palavras, é possível detectar estímulos em intervalos de até 1ms. Para a obtenção de variações rápidas ($f > 100 \text{ Hz}$) pode-se empregar então o uso de acelerômetros para realizar as aquisições.

Na questão física da velocidade de resposta há uma dependência direta da velocidade do sensor de partir do repouso ao acionamento e vice-versa à resposta do material à deformação, para tanto se torna interessante o uso da utilização de materiais viscoelásticos ao criar sensores.

Foi possível ver então alguns dos obstáculos na criação de sensores e uma lista de sugestões a ser em seguidas no desenvolvimento. Embora tendo esta lista em mãos, os pontos criticamente necessários para a criação de um sensor na prática são os itens 1,6 e 7, os quais são analisados experimentalmente em capítulos adiante.

2.8 CARACTERÍSTICAS DOS SENSORES

Quando atuando com sistemas de medição é necessário ter prévio conhecimento das características de trabalho dos sensores para que seja feita uma coleta de dados confiável para a aplicação. Essas características são geralmente disponibilizadas nas folhas de dados (*datasheets*), documento que possui as características técnicas de funcionamento do sensor.

Com o intuito de realizar uma comparação qualitativa entre o sensor desenvolvido e sistemas comuns utilizados nos dias de hoje, dentre as diversas características definidas em documentos de metrologia [18] foram escolhidas três tidas como mais interessantes para este estudo.

As características escolhidas foram:

I. Sensibilidade – A sensibilidade é a relação entre a variação do estímulo de entrada com o estímulo de saída, também definida como a inclinação da curva de resposta do sensor como demonstrado na figura 2-8.

Figura 2-8: Sensibilidade

II. Faixa de operação (*Range*) – A faixa de funcionamento de um sensor se encontra entre os limites mínimo e máximo na qual o estímulo pode variar e ser medido de maneira confiável como demonstrado na figura 2-9.

Figura 2-9: Faixa de operação

III. Tempo de resposta – O tempo de resposta é o tempo entre o estímulo ser exercido no sensor e a resposta ser obtida e o tempo levado para o sensor voltar ao repouso após cessar o estímulo como demonstrado na figura 2-10.

Figura 2-10: Tempo de resposta

Adaptado de: http://www.olson-technology.com/mr_fiber/images/Pulse-2.gif - Acesso: 30/11/2015

Tendo essas três características à mão, em capítulos adiante serão descritos *setups* experimentais e as obtenções dos dados para realizar as comparações.

2.9 LUZ

A luz é uma radiação eletromagnética no espectro visível, composta por dois campos perpendiculares oscilantes, um campo elétrico $\vec{E}$ e um campo magnético $\vec{H}$ como demonstrado na figura 2-11. Sua velocidade de propagação no espaço livre é simbolizada pela letra c , onde $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$, sendo ϵ_0 e μ_0 a permissividade e permeabilidade do vácuo respectivamente.

Figura 2-11: Onda eletromagnética

Adaptado de: [http://ffden-](http://ffden-2.phys.uaf.edu/webproj/212_spring_2014/Amanda_Mcpherson/Amanda_McPherson/em_electric_magnetic_propagating_waves.jpg)

[2.phys.uaf.edu/webproj/212_spring_2014/Amanda_Mcpherson/Amanda_McPherson/em_electric_magnetic_propagating_waves.jpg](http://ffden-2.phys.uaf.edu/webproj/212_spring_2014/Amanda_Mcpherson/Amanda_McPherson/em_electric_magnetic_propagating_waves.jpg)

- Acesso: 30/11/2015

2.10 POLARIZAÇÃO DA LUZ

Fontes de luz natural são geradas por campos elétricos oscilantes em todas as direções, porém utilizando filtros polarizadores ou realizando montagens com lentes é possível limitar ou até modificar a direção de oscilação em apenas uma direção como demonstrado na figura 2-12.

Figura 2-12: a) Onda não polarizada, b) Onda polarizada linearmente

Adaptado de: <https://aprendofotografia.files.wordpress.com/2014/02/esquema-polarizador-lineal.jpg> - Acesso: 01/12/2015

Considerando a luz polarizada linearmente em apenas uma direção, há duas possibilidades, a oscilação do campo elétrico paralela ao plano de incidência denominada polarização do tipo p (modo TM) e a oscilação perpendicular ao plano, sendo denominada polarização tipo s (modo TE) como demonstrado na figura 2-13.

Figura 2-13: Polarização perpendicular e paralela

Adaptado de: <http://ccm.geoscienceworld.org/content/57/2/227/F1.large.jpg> - Acesso: 01/12/2015

2.11 PROPAGAÇÃO EM DIFERENTES MEIOS

Embora a frequência de oscilação da luz f seja sempre constante, a velocidade de propagação, juntamente com o comprimento de uma onda λ depende das características do meio em que ela se encontra, sofrendo uma diminuição maior quanto mais denso for o meio [19]. No momento em que um feixe de luz passa de um meio para outro, ele sofre refração, resultando em transmissão de parte do feixe para o segundo meio e causando uma leve mudança no ângulo do feixe transmitido em relação à normal e uma reflexão onde parte da luz muda de direção e se mantém no meio onde a luz originalmente se propagava como demonstrado na figura 2-14.

Figura 2-14: Refração e reflexão de uma onda eletromagnética

Adaptado de: <http://www.jick.net/~jess/hr/skept/Waves/img218.png> - Acesso: 01/12/2015

As relações de intensidades refletidas e transmitidas podem ser determinadas utilizando as fórmulas de Fresnel conforme a tabela 2-2.

Tabela 2-2: Coeficientes de reflexão e transmissão dos tipos de polarização – Adaptado de: [20]

Polarização perpendicular (S - Modo TE)	
Coeficiente de reflexão $r_s = \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t}$	Coeficiente de transmissão $t_s = \frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t}$
Polarização paralela (P - Modo TM)	
Coeficiente de reflexão $r_p = \frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t}$	Coeficiente de transmissão $t_p = \frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t}$

A figura 2-15 apresenta gráficos das variações da proporção da luz transmitida e a refletida para polarização perpendicular. Porém, para o caso do índice de refração n_1 (onde o feixe se encontra) seja maior que o índice n_2 (material para onde o feixe está direcionado) é possível notar que em um ângulo de incidência específico, o feixe deixa de atravessar a interface e abruptamente passa a sofrer reflexão interna total, esse ângulo de incidência é denominado ângulo crítico.

Figura 2-15: Variação ângulo versus transmissão e reflexão

O efeito da refração pode ser descrito pela segunda lei de Snell (equação 2.2) onde se faz a relação do desvio angular entre os feixes.

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

Sendo:

n_1 o índice de refração do material 1

n_2 o índice de refração do material 2

θ_i o ângulo do feixe incidente

θ_t o ângulo do feixe transmitido

Pode-se obter o ângulo crítico supondo que o limite da refração se dá quando o ângulo do feixe transmitido é maior ou igual a 90° em relação ao plano normal.

Neste caso:

$$n_1 \sen \theta_i = n_2 \sen(90^\circ) \quad (2.3)$$

$$\sen \theta_i = \frac{n_2}{n_1} \quad (2.4)$$

$$\theta_i = \arcsen\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (2.5)$$

Ou seja, caso o feixe incida na interface em um ângulo em relação à normal menor que o ângulo crítico haverá a transmissão da luz de um meio para o outro, caso o ângulo seja maior que o ângulo crítico ocorrerá reflexão interna total como demonstrado na figura 2-16.

Figura 2-16: Influência do ângulo na reflexão interna total

O fenômeno da reflexão interna total, além de utilizado para a transmissão de dados em sistemas de telecomunicações, também permite a construção de sensores baseados no seu princípio físico. Alterando de certo modo a propagação da luz em um sistema baseado na reflexão interna total, pode-se construir um sensor de força, contato ou toque [21][22].

2.12 FIBRA ÓPTICA

A fibra óptica é um guia de onda dielétrico feito de materiais vítreos ou poliméricos e seu princípio de funcionamento se baseia no fenômeno da reflexão interna total, causado pela diferença do índice de refração entre o núcleo e casca, fazendo com que a luz seja guiada sofrendo inúmeras reflexões na fronteira entre os dois materiais [23] como demonstrado na figura 2-17.

Figura 2-17: Representação das reflexões internas totais em uma fibra óptica

As fibras ópticas podem ser feitas de vários tipos de materiais, entre os mais comuns há o SiO_2 (dióxido de silício) e a com núcleo de PMMA (polimetil-metacrilato), entre esses dois, o SiO_2 apresenta uma extrema baixa perda e o PMMA é utilizado como uma alternativa mais barata, mas com uma perda mais elevada, o que faz necessário um estudo entre custo e benefício ao empregá-las em sistemas de comunicação.

As fibras podem ser divididas em dois grupos distintos, o das fibras monomodo e o das fibras multimodo. Pode-se dizer que o critério que define o tipo é a quantidade de modos que a fibra aceita, consequência direta do diâmetro do seu núcleo (*core*), na figura 2-18 é possível ver uma comparação dos diâmetros mais comuns.

Figura 2-18: Relação entre diâmetros da fibra monomodo e multimodo

Adaptado de: <http://www.globalspec.com/reference/21701/160210/chapter-2-12-1-fiber-modes> - Acesso: 01/12/2015

Fibras monomodo possuem núcleos extremamente pequenos em relação a casca (*cladding*), resultando na capacidade de aceitação de apenas um modo de

propagação. Já as fibras multimodo possuem um núcleo consideravelmente grande, o que faz com que diversos modos possam ser guiados na fibra. É possível com análise do parâmetro característico do guia de onda denominado número V (frequência normalizada) determinar o modo de guiamento da luz em uma fibra.

A frequência normalizada é calculada utilizando a equação 2.6.

$$V = \frac{2\pi r_{\text{núcleo}}}{\lambda} NA = \frac{2\pi r_{\text{núcleo}}}{\lambda} \sqrt{n_{\text{núcleo}}^2 - n_{\text{casca}}^2} \quad (2.6)$$

Sendo:

V a frequência normalizada

$r_{\text{núcleo}}$ o raio do núcleo da fibra

λ o comprimento de onda da luz

NA a abertura numérica

$n_{\text{núcleo}}$ o índice de refração do núcleo

n_{casca} o índice de refração da casca

Para valores de $V < 2.405$, a fibra possui apenas um modo de propagação (monomodo) e para $V > 2.405$, possui diversos modos (multimodo) [24]. Os diferentes modos são basicamente os possíveis caminhos que a luz pode fazer em um guia de onda sendo que cada modo tem um padrão de campo elétrico e magnético que se repete ao longo da fibra. A ordem do modo está relacionada com o ângulo que a luz caminha em relação ao eixo da fibra, ou seja, modos maiores entram na fibra com angulações maiores e conseqüentemente sofrem mais reflexões ao longo do guia de onda como demonstrado na figura 2-19 [25].

Figura 2-19: Angulação de reflexão dos modos na fibra

Embora seja dito que a luz na fibra seja guiada no núcleo, é importante ressaltar que ela não se confina inteiramente no núcleo, quanto maior o modo consequentemente o ângulo de incidência, mais ele se estende penetrando na casca como demonstrado na figura 2-20.

Figura 2-20: Distribuição dos campos elétricos dos modos TE na fibra

Adaptado de: <http://www.tpub.com/neets/tm/30NVM018.GIF> - Acesso: 03/01/2016

Como é possível ver na figura 2-21, a relação entre potência no núcleo e potência total conduzida na casca pelos modos decresce com o aumento do número V [26], pois os modos vão se acomodando no núcleo.

Figura 2-21: Distribuição de potência dos modos

Adaptado de: <http://imagebank.osa.org/getImage.xqy?img=M3cubGFyZ2Usb2wtMzktNy0xOTYxLWcwMDM> - http://opticalengineering.spiedigitallibrary.org/data/Journals/OPTICE/21923/045003_1_5.png - Acesso: 01/12/2015

Para fibras monomodo, grande parte da luz guiada na fibra se distribui na casca o que resulta numa grande sensibilidade para sensores de fibra óptica, porém para

o sensor proposto é necessária uma fibra mais robusta e de fácil manuseio, fazendo com que seja necessária a utilização de núcleos maiores ou até mesmo fibras ópticas de plástico (POFs).

Ao optar por uma fibra com um diâmetro grande (0,5mm), encara-se uma diminuição relevante da potência luminosa que flui na casca como descrito pela relação em função do número V apresentada na equação 2.7 [27]:

$$\left[\frac{Pot_{casca}}{Pot_{total}} \right] = \frac{4\sqrt{2}}{3V} \quad (2.7)$$

É possível, no entanto, contornar essa perda de sensibilidade curvando o guia de onda como exposto em estudos por Gupta (1996). Com a curvatura os modos maiores rompem o ângulo crítico e deixam de serem guiados, já os modos menores tem seu ângulo forçosamente aumentado como demonstrado na figura 2-22.

Figura 2-22: Efeito da curvatura no guia de onda

Com o aumento do ângulo, tem-se uma distribuição maior de luz na casca e uma melhora na sensibilidade quando empregada esta configuração em sensores de fibra óptica. Em capítulos adiante é demonstrado com um simples experimento a melhora visível na sensibilidade.

2.13 FIBER TAPERING

Fibras ópticas são projetadas para terem o mínimo de perdas e consequentemente um melhor desempenho em sistemas de comunicação. Para que não haja grandes perdas, a casca que envolve o núcleo tem certo diâmetro mínimo para que o campo distribuído fora do núcleo não possa alcançar e entrar em contato com o meio externo, o que resultaria em uma atenuação da luz guiada. Porém para aplicações onde se usa a fibra como sensor é necessário que haja uma interação entre o campo e o meio externo, para isso é necessária a realização de um processo de modificação do guia de onda conhecido na literatura como *Fiber tapering*.

Fiber tapers podem ser criados a partir de fibras ópticas, com o intuito de modificar as características de propagação da fibra e o acoplamento eletromagnético da luz. Entre diversos métodos, o mais utilizado para se produzir um *Fiber taper*, baseia-se em esticar a fibra óptica longitudinalmente por ambos os lados, e utilizando uma chama [29][30][31], produz-se um aquecimento da ordem do ponto de fusão da fibra. Com alta temperatura e com a diminuição da viscosidade a fibra pode então ser esticada formando um pequeno afunilamento do núcleo e da casca, dando origem ao *Fiber taper*. Outros métodos também podem ser encontrados na literatura, utilizando aquecimento a base de eletricidade [32] ou até mesmo corrosão química [33][34].

2.14 FIBER TAPERS

O *Fiber taper* é composto por três regiões: a região onde não há aquecimento e a fibra mantém suas características iniciais; a região de transição, onde há a diminuição gradual do diâmetro; e a região principal do sensor onde se tem o menor diâmetro denominada cintura como demonstrado na figura 2-23.

Figura 2-23: Transições de um *Fiber taper*

Adaptado de: https://www.thorlabs.de/images/tabimages/GPX_Tapered_Fiber_A1-780.jpg - Acesso: 01/12/2015

Embora ocorra o colapso do núcleo em alguns *tapers*, ou apenas diminuição do diâmetro, o artigo base dessa pesquisa faz uso de uma fibra óptica que possui um núcleo com um diâmetro muito grande em relação à casca, o que com o aquecimento, resulta na extinção da casca e não do núcleo, consequentemente fazendo ocorrer reflexão interna total da luz entre o núcleo e o ar na região do *taper*.

Na figura 2-24 é possível ver o resultado do *fiber tapering* em diferentes diâmetros de núcleos.

Figura 2-24: Relação do resultado do *fiber tapering* em diferentes diâmetros de núcleos.

2.15 APLICAÇÕES

Realizando o *fiber tapering*, e assim modificando as propriedades da fibra óptica, é possível aproveitar de diversas maneiras o resultado. Além da criação de sensores [35][36], os *tapers* também oferecem a possibilidade de se filtrar modos de propagação de ordens maiores, continuando apenas com o modo fundamental com uma pequena perda de potência. Isso é possível porque devido à redução do diâmetro, modos maiores deixam de ser propagados no guia de onda [37]. É possível também realizar um *taper* comum entre duas fibras e acoplá-las dividindo então a potência entre as mesmas; esse tipo de configuração permite apenas um modo e mantém a direção de propagação proveniente da fibra principal [38][39].

2.16 ONDAS EVANESCENTES

Quando uma onda eletromagnética sofre efeito da reflexão interna total, há uma região na fronteira onde se formam ondas evanescentes, que são ondas que possuem decaimento exponencial e tendem a desaparecer com o distanciamento dessa fronteira. Essas ondas existem, pois de acordo com as equações de Maxwell, campos elétricos e magnéticos não podem ser descontínuos nas fronteiras [40].

Em uma segunda análise mais detalhada sobre a reflexão interna total, é possível demonstrar o surgimento de um campo elétrico evanescente.

Supondo um feixe se propagando no espaço no plano ZY, onde em $X = 0$ há uma interface com índices de refração n_1 e n_2 distintos e este feixe está sendo parcialmente refletido para a região $X < 0$ e transmitido (refratado) para a região $X > 0$ como demonstrado na figura 2-25.

Figura 2-25: Refração e reflexão de um feixe

Utilizando a equação de uma onda plana, uma das possíveis soluções das equações de Maxwell, o campo elétrico transmitido é dado por:

$$\vec{E}_t(r, t) = \vec{E}_0 e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)} \quad (2.8)$$

Sendo:

$\vec{E}_t(r, t)$ o campo elétrico transmitido em função da posição e o tempo

$\vec{E}_0$ o campo elétrico inicial

ω a frequência angular

Omitindo Z:

$$\vec{k} \cdot \vec{r} = kx \cos(\theta_t) \hat{x} + ky \sin(\theta_t) \hat{y} \quad (2.9)$$

Sendo:

$\vec{k}$ o vetor da onda

$\vec{r}$ o vetor posição

k o número da onda $\left(k = \frac{2\pi}{\lambda}\right)$

θ_t o ângulo do feixe transmitido

x a posição em x

y a posição em y

Portanto:

$$\vec{E}_t = E_0 e^{ikx \cos(\theta_t) \hat{x}} \cdot e^{iky \sin(\theta_t) \hat{y}} \cdot e^{-i\omega t} \quad (2.10)$$

Como:

$$\cos^2(\theta_t) = 1 - \sin^2(\theta_t) \Rightarrow \cos(\theta_t) = \sqrt{1 - \sin^2(\theta_t)} \quad (2.11)$$

E:

$$i = \sqrt{-1}$$

É possível obter:

$$\sqrt{1 - \sin^2(\theta_t)} = i \sqrt{\sin^2(\theta_t) - 1} \quad (2.12)$$

Já que:

$$i^2 = -1$$

Então:

$$\vec{E}_t = E_0 e^{-kx \sqrt{\sin^2(\theta_t) - 1} \hat{x}} \cdot e^{iky \sin(\theta_t) \hat{y}} \cdot e^{-i\omega t} \quad (2.13)$$

Obtém-se assim o campo elétrico transmitido:

$$\vec{E}_t = E_0 e^{i(ky \sin(\theta_t) - \omega t)} e^{-kx \sqrt{\sin^2(\theta_t) - 1} \hat{x}} \quad (2.14)$$

Como resultado então tem-se uma onda evanescente, consequência da reflexão interna total, uma onda na direção y , modulada por um decaimento exponencial ao longo da direção x . Essa situação é representada na figura 2-26.

Figura 2-26: Representação das ondas evanescentes

2.17 REFLEXÃO INTERNA TOTAL FRUSTRADA (FTIR)

Embora exista um campo evanescente originado na fronteira que penetra no segundo meio, não há troca de energia entre os meios desde que não haja interferência no meio externo. Porém caso a região entre a fronteira e o decaimento entre em contato com outro material, a onda evanescente se estende até o novo meio e então ocorre a transmissão da onda eletromagnética [41] como demonstrado na figura 2-27.

Figura 2-27: Reflexão interna total frustrada

Em uma demonstração feita por professores da Universidade de Nottingham [42] é possível conceituar melhor o comportamento do campo evanescente. Utilizando um transmissor de micro-ondas, um receptor e duas caixas em forma de prisma preenchidas com pastilhas de parafina foi feita a montagem ilustrada na figura 2-28.

Figura 2-28: Experimento de reflexão interna total frustrada utilizando micro-ondas

Como o comprimento de onda é muito maior que o tamanho das pastilhas as, micro-ondas as veem como um meio contínuo e ao serem emitidas pelo gerador sofrem reflexão interna total ao atingir a face maior do prisma P_1 .

Com a aproximação dos dois prismas é possível ver claramente que a certa distância o receptor de micro-ondas acusa por medição a transmissão de parte da luz refletida total internamente no P_1 até o ponto de contato total onde há o efeito de frustração da reflexão interna total. Pela literatura é possível calcular essa distância utilizando a relação apresentada a equação 2.15, sendo denominada profundidade de penetração (*penetration depth*) [28]:

$$d_p = \frac{\lambda}{2\pi n_1 \sqrt{\sin^2 \theta_i - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}} \quad (2.15)$$

Sendo:

$$\lambda = 3cm$$

$$n_{1(parafina)} \cong 1,4393 [43]$$

$$n_{2(ar)} \cong 1$$

$$\theta_i \cong 45^\circ$$

$$d_p = \frac{3 \text{ cm}}{2\pi \cdot 1,5 \sqrt{0,707^2 - (0,694)^2}} \cong 2,36 \text{ cm} \quad (2.16)$$

Portanto, com a aproximação de um material a uma distância menor que 2,36 cm há a interação com o campo evanescente criado na região onde há a reflexão interna total resultado numa atenuação da intensidade da onda refletida com proporcionalidade à proximidade, até certo ponto onde ocorre a frustração total e os dois prismas agem como um meio contínuo.

2.18 ATENUAÇÃO DA LUZ REFLETIDA TOTAL INTERNAMENTE

Quando um feixe de luz passa de um meio para outro, além de sofrer a refração apresentada anteriormente, há também a atenuação da luz que penetra no material causada pela absorção e o espalhamento, dependente diretamente da profundidade de penetração. Essa característica de atenuação pode ser contabilizada adotando o coeficiente de extinção imaginário κ ao índice de refração [44] como demonstrado na equação 2.17.

$$n^* = n + i\kappa \quad (2.17)$$

Sendo:

n^* o índice de refração complexo

n o índice de refração real

κ o índice de refração imaginário (absorção + espalhamento)

Supondo novamente a equação da onda plana:

$$\vec{E}_t(r, t) = \vec{E}_0 e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)}$$

E assumindo a propagação em $\vec{Z}$ em um meio com índice de refração n^* :

$$\vec{k} \cdot \vec{r}_z = \frac{n^* \omega z}{c} \quad (2.18)$$

Obtém-se:

$$\vec{E}_t(z, t) = \vec{E}_0 e^{i\left(\frac{n\omega z}{c} + i\frac{\kappa\omega z}{c} - \omega t\right)} \quad (2.19)$$

Rearranjando:

$$\vec{E}_t(z, t) = \vec{E}_0 e^{i\left(\frac{n\omega z}{c} - \omega t\right)} \cdot e^{i\left(i\frac{\kappa\omega z}{c}\right)} \quad (2.20)$$

Como resultado há uma onda atenuada na direção de propagação, à medida que penetra no material na direção $\vec{Z}$ como demonstrado na figura 2-29:

$$\vec{E}_t(z, t) = \vec{E}_0 e^{i\left(\frac{n\omega z}{c} - \omega t\right)} \cdot e^{\left(-\frac{\kappa\omega z}{c}\right)} \quad (2.21)$$

Figura 2-29: Atenuação de uma onda ao passar por um meio absorvedor

Adaptado de: <http://www.nutaq.com/sites/default/files/images/blog->

images/Figure%20%2023U2013%20Attenuation%20of%20an%20EM%20wave%20when%20crossing%20a%20conductive%20material.png - Acesso: 01/12/2015

Além da parte real do índice de refração ter influência na intensidade de luz refletida total internamente, há também uma influência relevante causada pela parte imaginária, um material quando aproximado da região onde ocorre a reflexão interna total causa uma absorção das ondas evanescentes, efeito esse que é empregado na espectroscopia de infravermelho (*Attenuated total internal reflectance spectroscopy*) [45].

Para ser realizado o procedimento, um feixe de luz é lançado através de um cristal de alto índice de refração em um ângulo que garanta que ele atinja a superfície em contato com a amostra e sofra reflexão interna total uma ou mais vezes como demonstrado na figura 2-30. Essa reflexão cria um campo evanescente que se estende até a amostra onde é absorvido e resulta numa diminuição da luz refletida total internamente, essa diminuição é captada então pelo equipamento e devidamente trabalhada para se obter os dados finais.

Figura 2-30: Representação da configuração utilizada na espectroscopia de infravermelho

Adaptado de: http://www.utsc.utoronto.ca/~traceslab/ATR_FTIR.pdf - Acesso: 01/12/2015

É essencial nesse caso que o índice de refração do cristal seja superior ao da amostra, caso contrário não é possível que haja reflexão interna total. É importante também que a diferença entre os índices seja grande, pois quão maior for, mais inclinadamente pode se atingir o feixe na superfície obtendo-se uma penetração maior do campo evanescente e consequentemente uma sensibilidade maior.

Após a revisão conceitual dos efeitos físicos pertinentes da interação da luz com a matéria é possível então entender o funcionamento do sensor proposto nesse trabalho.

2.19 FUNCIONAMENTO DO SENSOR PROPOSTO

Utilizando uma modificação da teoria de Beer-Lambert apresentada por Gupta [28] geralmente aplicada a sensores de concentração utilizando fibras ópticas, é possível saber que a intensidade da luz guiada na fibra após sua passagem pela região do sensor é pela equação 2.22.

$$P = P_0 e^{-(\gamma \cdot L)} \quad (2.22)$$

Sendo:

P a potência da luz após atravessar a região absorvedora

P_0 a potência antes de atravessar a região

γ o coeficiente de absorção evanescente

L o comprimento da região exposta à absorção

Na figura 2-31 é demonstrado visualmente cada termo da equação.

Figura 2-31: Representação do modelo de Gupta

No sensor proposto neste trabalho se utiliza silicone industrial comum (sem modificações físico-químicas), onde pode-se afirmar que após a cura o coeficiente de absorção evanescente é constante dado que não haverá variação da concentração. No entanto, é possível variar a atenuação da intensidade da potência alterando o comprimento da região exposta à absorção como demonstrado na figura 2-32.

Figura 2-32: Representação da variação da área de contato do silicone com o *Fiber taper*

É possível criar esta condição, depositando levemente silicone sobre o *Fiber taper*, fazendo com que ele fique no limiar de contato, e caso seja rompido causará FTIR como demonstrado na figura 2-33.

Figura 2-33: Representação da pressão causando contato e frustração da reflexão interna total

Com a aproximação do silicone à região do *Fiber taper* o campo evanescente entra em contato com o silicone e tem-se uma atenuação que aumenta gradativamente até o contato com a própria fibra, causando a FTIR, e à medida que há o aumento da deformação tem-se uma área superficial cada vez maior em contato com o silicone. Diferentes níveis de força exercida resultam em diferentes níveis de atenuação na transmissão da luz acoplada na fibra e essa atenuação pode ser medida e relacionada então com a força agindo sobre o sensor, criando assim o sensor desenvolvido neste trabalho.

Na figura 2-34 está demonstrado simplificadamente o funcionamento do sensor.

Figura 2-34: Funcionamento simplificado do sensor

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo descreve a metodologia utilizada no desenvolvimento e fabricação de um sensor de força utilizando *Fiber taper*. Serão descritos também as ferramentas, softwares, equipamentos eletrônicos, circuitos eletrônicos e tratamento da fibra.

3.1 COMPARAÇÃO

Tendo como base a sensibilidade, tempo de resposta e faixa de operação, pode-se fazer a comparação entre o sensor de *Fiber taper* e um sensor comum de força. Para isso foi escolhido um *Force sensing resistor* (FSR), um tipo de sensor comumente utilizado nos dias de hoje e que pode ser visto em diversos artigos [46][47]. Este tipo de sensor, nada mais é do que uma resistência elétrica que varia de acordo com a pressão nele exercida, diferentemente dos sensores do tipo extensômetros (*Strain gauge*) onde a mudança na resistência se dá ao efeito piezoresistivo.

Na figura 3-1 é possível ver a diferença entre um *Strain gauge* e um *Force sensing resistor*.

Figura 3-1: a) Foto de um *Strain gauge*, b) Foto de um *Force sensing resistor*

Adaptado de: http://www.ni.com/cms/images/devzone/tut/strain_gage.jpg - <https://cdn.sparkfun.com/assets/parts/2/9/6/7/09375-1.jpg> - Acesso: 01/12/2015

Um *Force sensing resistor* é um sensor composto por dois filmes de polímero e um padrão condutivo é depositado em um dos lados de modo que quase se entrelacem. Em seguida um polímero semiconductor é depositado no outro filme e então são colocados um contra o outro [2] como é possível ver na figura 3-2. O princípio se baseia no fato de haver micropartículas condutivas dentro do material polimérico e com

a pressão há um aumento da superfície de contato entre elas e consequentemente uma diminuição da resistividade no material.

Figura 3-2: Vista explodida de um *Force sensing resistor*

Adaptado de: [48]

É possível encontrar no próprio *datasheet* [48] como se comporta o *Force sensing resistor* em resposta aos níveis de força exercida. Como pode-se ver na figura 3-3, a resposta não é linear, de início ela possui uma queda abrupta e com o avanço a resistência diminui de forma mais sutil, característica interessante quando o sistema em questão requer sensibilidade a leves interações.

Figura 3-3: Diminuição da resistência em função da força exercida num *Force sensing resistor*

Adaptado de: [48]

3.2 CONDICIONAMENTO DE SINAIS

É necessário fazer um condicionamento de sinais para que seja possível analisar a resposta dos sensores, ajustando-os à faixa de trabalho dos sistemas, para isso foi empregado o uso de Amplificadores Operacionais.

Na figura 3-4 é possível ver a representação simbólica do amplificador operacional, uma foto do componente e a ligação dos pinos.

Figura 3-4: Representação simbólica, pinagem e foto de um Amplificador operacional

Adaptado de: http://www.ustudy.in/sites/default/files/images/opamp_block.jpg - <http://tangentsoft.net/elec/bitmaps/opamp-pinout-single.png> - <http://miniimg.rightinthebox.com/images/384x384/201410/qvszad1413954082075.jpg> - Acesso: 01/12/2015

Um amplificador operacional é um é um amplificador diferencial com alta impedância de entrada, baixa impedância de saída e um ganho diferencial muito alto, teoricamente infinito. Duas das configurações mais comumente utilizadas para o condicionamento de sinais a partir de amplificadores operacionais são as configurações amplificador inversor e não inversor [49], ilustrados de maneira simplificada nas figuras 3-5 e 3-6.

Figura 3-5: Configuração inversora simplificada

Onde o ganho de tensão é dado por:

$$V_o = -V_i \frac{R_2}{R_1} \quad (3.1)$$

Figura 3-6: Configuração não inversora simplificada

Onde o ganho de tensão é dado por:

$$V_o = V_i \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (3.2)$$

Ambas as configurações foram aprimoradas e utilizadas para o condicionamento dos sinais provenientes dos dois sensores, em capítulos adiante elas são detalhadas.

1.1 *OFFSET*

Como a atenuação na luz esperada é da ordem de grandeza de no máximo 50% em referência do valor inicial ajustado, é necessária a eliminação do nível DC presente para que seja possível aproveitar melhor o sinal, por esse motivo, é necessário um ajuste de *offset* da tensão de saída circuito.

Para fazer o ajuste de é possível empregar um circuito subtrator demonstrado na figura 3-7.

Figura 3-7: Configuração subtratora simplificada

$$V_o = V_2 \left(\frac{R_3}{R_2} \right) - V_1 \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \quad (3.3)$$

Portanto ao substituir o sinal da entrada não inversora (V_+) por um nível de **DC** de tensão, haverá sempre uma subtração da tensão na saída, resultando num deslocamento do nível podendo ele ser para cima ou para baixo, como é possível ver no exemplo da figura 3-8.

Figura 3-8: Exemplo de correção do *offset*

Para que seja possível uma regulação do *offset* mais versátil a entrada não inversora (V_+) foi dotada de um divisor de tensão utilizando um resistor variável.

3.3 FILTRAGEM DE RUÍDOS

Circuitos eletrônicos geralmente são vulneráveis a interferências eletromagnéticas e interferências vindas da rede elétrica (60 Hz). Essas interferências em certos tipos de circuito não são substanciais, porém em circuitos de medição como no caso uma pequena distorção ou ruído quando amplificado pode vir a tornar-se uma barreira no funcionamento do circuito.

Para resolver esse problema a primeira ação a ser tomada na diminuição de interferências é o uso de filtros eletrônicos, para isso foi empregado um filtro passa-baixas.

Considerando o seguinte circuito eletrônico ilustrado na figura 3-9:

Figura 3-9: Função de saída em relação ao capacitor e resistor

Pela função de transferência podemos obter a seguinte resposta (figura 3-10) em frequência para o capacitor (para $R=80K\Omega$ e $C=100nF$)

Figura 3-10: Resposta em frequência da função de transferência do capacitor e resistor

Pode-se notar que para baixas frequências o capacitor tem uma boa resposta, mas para altas frequências, há uma atenuação da resposta. É possível utilizar essa característica em um circuito eletrônico como um filtro, atenuando frequências indesejadas.

É denominada frequência de corte de um circuito o ponto onde a tensão cai à 70,7% do valor da faixa de passagem. Esse ponto pode ser calculado igualando a impedância real com a impedância imaginária (reatância capacitiva) do sistema como demonstrado na equação 3.4.

$$R = X_C \rightarrow R = \frac{1}{2\pi fC} \therefore f = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3.4)$$

Para: $R = 80K\Omega$ e $C = 100nF$

Tem-se: $f \cong 20Hz$

Em outras palavras, frequências acima de 20Hz sofrerão uma atenuação na medição na saída, e ao ser empregado em um circuito auxiliará na minimização de erros de medição.

Como é possível ver ilustrado nas figuras 3-11 e 3-12, onde encontra-se uma senóide de 10 Hz envolta por um ruído de 100 Hz, e após passar pelo filtro eletrônico o ruído sofre uma atenuação drástica.

Figura 3-11: Representação da filtragem de 1ª ordem de um sinal

Figura 3-12: Representação da filtragem de 2ª ordem de um sinal

Tendo em mãos o conceito de filtros, com o intuito de reduzir interferências e ruídos no circuito de tratamento de sinais, foram empregados filtros passa-baixa que são detalhados em capítulos adiante.

3.1 CIRCUITO DO *FORCE SENSING RESISTOR*

Visando uma maior flexibilidade no ajuste dos parâmetros, alterando a configuração não inversora, foi obtido o seguinte circuito eletrônico mostrado na figura 3-13.

Figura 3-13: Circuito simplificado do *Force sensing resistor*

Como o ganho de tensão depende da tensão na entrada não inversora (V_+) e da razão entre os resistores R_2 e R_3 , o como ganho resultante tem-se a equação 3.5.

$$V_{out} = \left(V_{ref} \times \frac{R_1}{FSR + R_1} \right) \times \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \quad (3.5)$$

Esse circuito foi feito de modo que torna-se possível ajustar o ganho do sinal e tensão da entrada dado pelos valores R_2 e R_3 e alterar a tensão resultante do divisor de tensão entre *Force sensing resistor* e R_1 , o que resulta num acréscimo de resolução em uma determinada faixa.

3.2 CIRCUITO DO TRANSDUTOR DE LUZ

Para obter informações sobre a variação da luz, é necessária a utilização de um circuito capaz de responder a estímulos luminosos com uma saída de tensão proporcional à intensidade da luz incidida. Para a criação do circuito foi utilizado o componente fotodetector BPW34 demonstrado na figura 3-14.

Figura 3-14: Foto de um fotodetector BPW34

Disponível em: <http://www.osioptoelectronics.com/productimages/Photodiode-pkg-19-BPW34.jpg> - Acesso: 01/12/2015

Quando a luz incide em um fotodetector, devido ao efeito fotoelétrico há uma geração de corrente, porém como no caso em questão a corrente gerada é de baixa intensidade devido à resposta do componente e da baixa intensidade luminosa utilizada, é necessária a amplificação do sinal para que ele possa ser medido com boa resolução. Na figura 3-15 é mostrada a resposta do componente em μA para a irradiância utilizando luz infravermelha ($\lambda = 950nm$) e à direita a sensibilidade espectral ao comprimento de onda utilizado [50]:

Figura 3-15: Relação de irradiância versus corrente e comprimento de onda versus sensibilidade espectral relativa do fotodetector

Adaptado de: [50]

Para converter a corrente gerada pelo componente em tensão e amplificá-la, foi utilizado um amplificador operacional na configuração não inversora em modo de transimpedância (transforma a corrente de entrada em tensão de saída) como representado na figura 3-16:

Figura 3-16: Amplificador de transimpedância

Utilizando a teoria de amplificadores operacionais é possível estabelecer a seguinte relação pela lei de *Kirchhoff*:

Figura 3-17: Análise das correntes pela lei *Kirchhoff*

$$I_D + I_1 = 0$$

$$I_1 = \frac{V_o}{R_1} \therefore V_o \cong -R_1 I_D \quad (3.6)$$

Como o ganho de tensão é diretamente relacionado a R_1 foram empregados resistores variáveis para que seja possível ajustar o ganho com mais flexibilidade.

3.3 PROJETO DO DIAGRAMA ESQUEMÁTICO

O projeto dos circuitos foi feito utilizando o software Proteus (Isis & Ares), com o Isis foi feito o diagrama esquemático do circuito eletrônico dos sensores.

O circuito se divide nos seguintes quatro estágios:

1- Dois reguladores, um de +12V e -12V para que seja disponibilizada uma fonte simétrica (ilustrado na figura 3-18).

Figura 3-18: Fonte simétrica regulada de $\pm 12V$

2- Estágio não inversor com divisor de tensão e ganho variáveis para o *Force sensing resistor* (ilustrado na figura 3-19).

Figura 3-19: Estágio não inversor com divisor de tensão

3- Estágio inversor amplificador de transcondutância com alto ganho (ajuste fino e grosso) variável para o fotodetector (ilustrado na figura 3-20).

Figura 3-20: Estágio inversor de transimpedância

Estágio final inversor com $AV_{FSR} = 1$ e $AV_{foto} \cong 20$ dotado de filtro passa-baixas de 2ª ordem fixo em $f_c \cong 108Hz$ (ilustrado na figura 3-21).

Figura 3-21: Estágio final com filtro de 2ª ordem

4- Conjunto pertencente ao estágio final ligado à entrada não inversora (V_+) do amplificador operacional do último estágio utilizado para

realizar a correção de *offset*. O nível DC resulta do divisor de tensão entre os resistores variáveis R_1 , R_2 e R_3 (ilustrado na figura 3-22).

Figura 3-22: Correção do *offset*

5- O conector J12 foi empregado para ser possível a seleção entre o sinal proveniente do estágio fotodetector e o sinal do *Force sensing resistor*. Já o conector J13 foi feito para ser possível utilizar o nível DC para correção do *offset* ou zerar a subtração do nível aterrando a entrada não inversora (V_+) como ilustrado na figura 3-23.

Figura 3-23: Chaveamento entre o *Force sensing resistor* e o *Fiber taper*

O diagrama esquemático do circuito eletrônico completo está disponível no apêndice [1A].

3.4 PROJETO DA PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO (PCB)

Após o projeto do diagrama, o projeto da placa de circuito impresso foi feito utilizando o software Ares, onde é possível rotear todas as trilhas e fazer as ligações entre os componentes e obter um *layout*, como pode ser visto na figura 3-24.

Figura 3-24: *Layout* da placa de circuito impresso (PCB)

3.5 PROTOTIPAGEM E MONTAGEM

Para a criação da placa de circuito impresso foi utilizada a prototipadora LPKF ProtoMat S103 (figura 3-25) disponível no Laboratório de Instrumentação Eletrônica para Óptica (LIEPO).

Figura 3-25: Prototipadora ProtoMat LPKF S103

Realizando o processo de fresagem foi obtida a placa de circuito impresso pronta para serem colocados os componentes do circuito.

Na figura 3-26 é possível ver a placa pronta e o resultado após os componentes serem soldados.

Figura 3-26: Circuito impresso e placa com componentes soldados

Após a montagem e ligação dos fios de sinal e alimentação, o circuito foi colocado numa caixa de alumínio, para que haja um efeito de blindagem, reduzindo interferências externas.

Figura 3-27: Caixa de blindagem do circuito e circuito montado

As entradas e saídas de sinal foram dotadas de conectores BNC, pois o uso de cabos coaxiais reduz o ruído.

Figura 3-28: Entrada e saída de sinal

4 MONTAGEM DO SENSOR PROPOSTO

4 MONTAGEM DO SENSOR PROPOSTO

4.1 PREPARAÇÃO DA FIBRA

Para que se possa ter um melhor acoplamento da luz na fibra, é necessário polir as pontas das fibras e limpá-las. Para o polimento foi utilizado um conjunto de lixas específicas para fibra óptica (figura 4-1) disponíveis no laboratório e feita a limpeza com álcool isopropílico.

Figura 4-1: Lixas para fibra óptica

O polimento deve ser feito da maior para a menor granulação e é importante que haja um padrão de polimento em forma de “S” para que haja uma uniformidade na ponta da fibra como demonstrado na figura 4-2.

Figura 4-2: Representação da fibra não polida e polida

Para que seja feito *fiber tapering* foram acoplados dois suportes para a fixação da fibra, um estacionário e outro que pode ser transladado e possui um paquímetro acoplado para medição da progressão no comprimento da fibra como mostra a figura 4-3.

Figura 4-3: Suporte para realização do *fiber tapering*

Para o aquecimento, como a fibra escolhida é de PMMA (polimetilmetacrilato) é possível realizar o *tapering* com a ajuda de um soprador térmico disponível no laboratório visto na figura 4-4. Este equipamento emite calor a uma temperatura de até 500°C, temperatura mais do que suficiente para diminuir a viscosidade do material da qual é composta a fibra.

Figura 4-4: Soprador térmico disponível no laboratório

Adaptado de: <http://xsupply->

loja.com.br/loja/media/catalog/product/cache/1/image/9df78eab33525d08d6e5fb8d27136e95/s/o/soprador_hl1500.1.jpg - Acesso:

01/12/2015

4.1 FIBER TAPERING

A fibra escolhida para ser utilizada no sensor é uma fibra PMMA comum de 0,5mm (SZ-500 – Syzfiber). Após o polimento e limpeza, a fibra é fixada nos suportes e dado início ao aquecimento. Primeiro mantém-se o soprador térmico estático a uma pequena distância aquecendo a região principal do *taper* e após uma diminuição visível da cintura, desloca-se de maneira oscilatória o fluxo de ar com o intuito de criar uma região maior de aquecimento e mantendo o diâmetro da cintura criada anteriormente. Para se criar forças longitudinais que causem estiramento da fibra translada-se continuamente o suporte móvel acoplado ao paquímetro. Seguindo este passo a passo, foi obtida uma amostra com cintura de 0,15mm e um acréscimo de $L=10\text{mm}$ na amostra.

Na figura 4-5 é possível ver uma comparação vista por microscópio da cintura e a região não modificada com magnificação de 4x.

Figura 4-5: Comparação da fibra comum com o *Fiber taper* pelo microscópio com magnificação de 4x

Após a preparação da fibra é possível ver em uma comparação das duas fibras com luz acopladas provenientes da mesma fonte de luz (laser pointer verde $\lambda = 532\text{nm}$) que na região do *taper* há uma grande perda da luz acoplada.

Essa perda se dá devido à variação do diâmetro da fibra fazendo com que modos superiores que estavam acoplados não consigam mais se guiar e se percam na região da cintura do *taper* como demonstrado na figura 4-6.

Figura 4-6: Demonstração da luz escapando na cintura do *Fiber taper*

Preparando uma simples montagem (figura 4-7) acoplando a luz na fibra e realizando a medição da intensidade transmitida utilizando medidor LabMax-TOP fabricado pela empresa Coherent, é possível notar que caso a região do *taper* esteja submersa em água, há uma interferência perceptível na propagação da luz devido à mudança do meio externo (figura 4-9 e 4-10) quando comparada com a transmissão livre de interferências (figura 4-8).

Figura 4-7: Fibra fixada para experimentos

Figura 4-8: Medida da potência luminosa transmitida pela fibra sem interferências

Figura 4-9: Fibra óptica submersa em água

Figura 4-10: Medida da potência luminosa transmitida pela fibra submersa em água

Ao comparar as medidas obteve-se:

$$Atenuação = \left[\frac{4,679}{5,395} \times 100 \right] \% \cong 86,7\%$$

4.2 FIBER TAPERING CURVADO

Gupta (1996) [28] em um de seus estudos demonstra que um *Fiber taper* quando curvado adquire um aumento considerável de sua sensibilidade.

Ao curvar o *Fiber taper*, há uma perceptível queda na intensidade luminosa sem interferências como é visto nas figuras 4-11 e 4-12, isso é causado pelo fato de que com a curvatura há uma mudança da angulação de incidência da luz fazendo com que haja rompimento do ângulo crítico para certos modos.

Figura 4-11: Fibra curvada sem interferências

Figura 4-12: Medida da potência transmitida pela fibra curvada sem interferências

Com a curvatura da fibra há aumento da angulação da incidência e consequentemente um aumento da profundidade de penetração, o que resulta em um aumento significativo da sensibilidade a interferências do campo evanescente como é possível ver nas figuras 4-13 e 4-14.

Figura 4-13: Fibra óptica curvada submersa em água

Figura 4-14: Medida da potência luminosa transmitida pela fibra curvada submersa em água

Ao comparar as medidas obteve-se:

$$Atenuação = \left[\frac{1,7924}{4,123} \times 100 \right] \% \cong 43,4\%$$

Pode-se ver claramente entre as porcentagens de luz atenuada que utilizando o *Fiber taper* curvado há mais sensibilidade como demonstrado na tabela 4-1, por esse motivo foi empregada essa característica no sensor proposto.

Tabela 4-1: Comparação das atenuações entre a configuração comum e curvada

Configuração	Medida sem interferências	Medida com água	Variação
<i>Fiber taper</i> comum	5,395 mW	4,679 mW	86,70%
<i>Fiber taper</i> curvado	4,123 mW	1,7924 mW	43,40%

4.1 CRIAÇÃO DO SENSOR

Em sequência, para que seja fabricado o sensor, foi projetado e usinado na oficina mecânica do Instituto de física de São Carlos (IFSC) um molde externo e um disco feitos de PTFE (politetrafluoretileno, conhecido comercialmente como teflon), este material foi escolhido pois é antiaderente e isso facilita a remoção do sensor. O disco base do sensor, onde a fibra e o silicone foram fixados foi feito de plástico ABS (acrilonitrila butadieno estireno) comum e foi prototipado a impressora 3D disponível no LAT.

O molde possui as seguintes medidas:

Figura 4-15: Dimensões do molde do sensor

Para a criação da tampa que cobre o *Fiber taper* foi escolhido um silicone acético comum, de baixo custo e dureza *shore A (15)* [51]. No processo foi fixado um pedaço de fibra óptica comum de 1mm de diâmetro no molde, encaixando a nos canais como é possível ver na figura 4-16. Em seguida após o silicone ter sido depositado no molde foi feita pressão com o disco de PTFE para acomodação do material e dado um período de 2 dias para a secagem como é possível ver na figura 4-17.

Figura 4-16: Foto do molde usinado aberto

Figura 4-17: Foto do molde preenchido com silicone

Após o enrijecimento do silicone e a retirada das peças de dentro do molde foi obtida a base do sensor. Ao remover a fibra óptica há a criação de um canal de 1mm na qual será inserida a fibra como demonstrado na figura 4-18.

Figura 4-18: Base do sensor vista por microscópio

Após a inserção do *Fiber taper* curvado e a fixação da fibra na base está pronto o sensor para testes como demonstrado na figura 4-19

Figura 4-19: Sensor de força utilizando *Fiber taper*

Na figura 4-20 é possível entender melhor o sensor obtido como resultado.

Figura 4-20: Vista isométrica do sensor obtido

E na figura 4-21 é possível visualizar melhor o posicionamento do *taper* curvado.

Figura 4-21: Vista superior com o posicionamento do *taper* curvado

5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5.1 OBTENÇÃO DE DADOS E COMPARAÇÃO

Após a junção do silicone com a fibra foram então coletados os dados e feitas as análises das características para a comparação com o *Force sensing resistor*. Para que seja feita uma análise confiável foi utilizado um sistema composto por um estágio de translação XYZ e uma balança de precisão de até um grama. O estágio de translação XYZ é um equipamento dotado de 3 parafusos que fazem a movimentação nos três eixos com precisão micrométrica. Utilizando sua movimentação no eixo vertical disposta a modo que a movimentação force uma ponteira contra a amostra posicionada em cima da balança como é possível ver nas figuras 5-1 e 5-2, é possível então exercer diversos níveis de força sobre a amostra e ter o valor de peso lido na balança como referência.

Figura 5-1: Montagem para medição de forças

Figura 5-2: Posicionamento do sensor

Para a aquisição de dados, foi utilizada uma placa de aquisição fabricada pela empresa National Instruments (NI cDAQ-9172 - NI 9215) que pode ser vista na figura 5-3. Para realizar a aquisição o circuito pode ser conectado à entrada BNC da placa de aquisição

Figura 5-3: Placa de aquisição da National Instruments

Utilizando o software LabVIEW que faz comunicação com a placa de aquisição, foi criada a função ilustrada na figura 5-4 para realizar a aquisição:

Figura 5-4: *Layout* da função em LabVIEW

Após ter executado a função em modo contínuo a amostra terá um tamanho em segundos de acordo com o a constante “Tempo da amostra (s)”.

5.2 SENSIBILIDADE

Para caracterizar a sensibilidade, utilizando o estágio de translação foram exercidos diversos níveis de força nos dois sensores utilizando diferentes tipos de pontas, e foram então coletados e correlacionados os níveis de força com a tensão adquirida. No início de cada experimento foi ajustada a tensão equivalente ao ponto máximo da curva próximo ao valor máximo do conversor analógico-digital (10V) para se obter uma maior excursão e precisão.

5.3 PROCEDIMENTO

Foi fixado o estágio de translação na mesa óptica, as amostras foram posicionadas na bandeja da balança e foram utilizados 3 tipos ponteiros de diâmetros diferentes para realizar as aquisições exercendo um esforço vertical nos sensores sobre a balança. Para a escala de força de 30g e 100g foi utilizada a ponta de 3mm, para a escala de 1000g foi utilizada uma ponta de 5mm e para escalas maiores foi utilizada a ponta de 10mm como é possível ver na figura 5-5.

Pouco a pouco o ajuste foi feito até ser alcançada a força final e foram anotados os dois valores de cada ponto dando origem às tabelas que se encontram no apêndice e os gráficos dos itens 5.4 e 5.5.

Figura 5-5: Foto das pontas utilizadas no experimento

5.4 AQUISIÇÕES COM O SENSOR *FIBER TAPER*

Figura 5-6: Gráfico das tensões obtidas ajustando 100g para 10V utilizando o *Fiber taper*

$$V_{out} = 0,0997 \times g - 0,8418 \quad (5.1)$$

$$R^2 = 0,9946$$

Figura 5-7: Gráfico das tensões obtidas ajustando 1000g para 10V utilizando o *Fiber taper*

$$V_{out} = 0,0099 \times g - 0,8318 \quad (5.2)$$

$$R^2 = 0,9951$$

Figura 5-8: Gráfico das tensões obtidas ajustando 2000g para 10V utilizando o *Fiber taper*

$$V_{out} = 0,0056 \times g - 0,511 \quad (5.3)$$

$$R^2 = 0,9978$$

Figura 5-9: Gráfico das tensões obtidas ajustando 3000g para 10V utilizando o *Fiber taper*

$$V_{out} = 0,0032 \times g - 0,3023 \quad (5.4)$$

$$R^2 = 0,9935$$

5.5 AQUISIÇÕES COM FSR 402 (INTERLINK ELECTRONICS)

Figura 5-10: Gráfico das tensões obtidas ajustando 100g para 10V utilizando o FSR 402

$$V_{out} = -0,001 \times g^2 + 0,2098 \times g - 1,9486 \quad (5.5)$$

$$R^2 = 0,9573$$

Figura 5-11: Gráfico das tensões obtidas ajustando 1000g para 10V utilizando o FSR 402

$$V_{out} = -1^{-5} \times g^2 + 0,0203 \times g + 0,6643 \quad (5.6)$$

$$R^2 = 0,9934$$

Figura 5-12: Gráfico das tensões obtidas ajustando 2000g para 10V utilizando o FSR 402

$$V_{out} = -2^{-6}x g^2 + 0,0075 x g + 2,1966 \quad (5.7)$$

$$R^2 = 0,9984$$

Figura 5-13: Gráfico das tensões obtidas ajustando 3000g para 10V utilizando o FSR 402

$$V_{out} = -1^{-6}x g^2 + 0,0055 x g + 2,7098 \quad (5.8)$$

$$R^2 = 0,9953$$

É possível concluir então a partir dos dados que o sensor criado a partir do *Fiber taper* possui uma resposta aproximadamente linear e o *Force sensing resistor* como previsto apresenta uma resposta entre logarítmica e polinomial.

A partir das regressões lineares é possível determinar aproximadamente a sensibilidade do sensor para as 4 curvas:

Tabela 5-1: Valores de sensibilidade determinados para as medições do *Fiber taper*

	Sensibilidade
100g	99,7mV / g
1000g	9,9mV / g
2000g	5,6mV / g
3000g	3,2mV / g

Para identificar a sensibilidade do *Force sensing resistor* foram calculadas diversas inclinações de retas entre as medidas vizinhas devido à sua resposta não linear como demonstrado na figura 5-14.

Figura 5-14: Representação da obtenção das sensibilidades

$$\Delta s_i = \frac{\Delta v_i}{\Delta f_i} \quad (5.1)$$

Tabela 5-2: Tabela das sensibilidades determinadas para posições distintas das medições do *FSR*

	Δs_1	Δs_2	Δs_3	Δs_4
100g	169mV / g	10,2mV / g	6,58mV / g	4,57mV / g
1000g	66,4mV/g	4,93mV / g	5,29mV / g	2,85mV / g
2000g	63,5mV / g	2,15mV / g	2,56mV / g	1,19mV / g
3000g	75mV / g	1,47mV / g	1,52mV / g	678uV / g

5.6 LIMITE MÍNIMO E MÁXIMO DO RANGE

Com o intuito de analisar a sensibilidade dos sensores, além de escalas em valores superiores, também temos o interesse em ver os limites de resposta os sensores, para isso foi ajustado o ganho dos sensores no limite para obter uma alta precisão.

Utilizando o sensor feito com *Fiber taper* apenas com a ponta de 3mm foi possível fazermos medições tão baixas quanto 1 grama, como mostram os dados a seguir:

Figura 5-15: Gráfico de tensões obtidas ajustando 30g para 10V utilizando o *Fiber taper*

$$V_{out} = 0,3098 \times g - 0,4121 \quad (5.9)$$

$$R^2 = 0,9978$$

$$\text{Sensibilidade} \cong 300\text{mV} / g$$

Utilizando o *Force sensing resistor*, não foi possível obter medições de níveis tão baixos devido à instabilidade, porém conectando suas duas pontas em um multímetro no modo resistência e graduando aos poucos a força exercida no sensor e balança é possível estipular o limite mínimo utilizando.

Utilizando as diferentes pontas o sensor rompeu a situação de não contato ($R = \infty$), em seguida passou a decrementar normalmente, ambos entre 10g em 20g como é possível ver na tabela 5-3.

Tabela 5-3: Tabela de forças de ativação e estabilidade do FSR 402

Ponta	Força de ativação	Variação da resistência	Comportamento estável	Resistência
3mm	15g	12M Ω ~ 14M Ω	16g	80k Ω
5mm	16g	800k Ω ~ 1,2M Ω	18g	140k Ω
10mm	12g	2M Ω ~ 2,1M Ω	16g	180k Ω

Pode-se concluir então que o limiar gira em torno de 15g.

5.7 TEMPO DE RESPOSTA

Para que seja caracterizado o tempo de resposta dos sensores, foi utilizado um *mini shaker* modelo 4810 fabricado pela empresa Brüel & Kjær (figura 5-16) cedido pelo Laboratório de Dinâmica (LabDin) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC).

Figura 5-16: *Mini shaker* modelo 4810

Disponível em:

http://www.bksv.com/~media/New_Products/vibration%20test%20systems/Measurement%20exciters/Type%204810/Type4810.aspx?mh=600&mw=600&bc=white - Acesso: 03/01/2016

Um *shaker* eletrodinâmico é um atuador composto por um ímã permanente e um solenóide que quando alimentado por corrente sofre atração ou repulsão resultando em uma oscilação na frequência desejada como demonstrado na figura 5-17.

Figura 5-17: Funcionamento de um shaker

Para acionar o *mini shaker* é necessário um gerador de sinais e um amplificador de potência para fornecer corrente o suficiente para excitá-lo como ilustrado na figura 5-18.

Figura 5-18: Alimentação do *mini shaker*

O gerador utilizado foi o Agilent 33500B visto na figura 5-19 e o amplificador de potência utilizado foi o Type 2706 visto na figura 5-20.

Figura 5-19: Gerador de funções Agilent 33500B

Disponível em http://about.keysight.com/en/newsroom/imagegallery/library/33500_images/image004_high.jpg - Acesso:

03/01/2016

Figura 5-20: Amplificador de potência Type 2706

Disponível em: http://b.goistatic.com/data/auctions/Auction18868/EU306411_1.JPG - Acesso: 03/01/2016

O *mini shaker* foi posicionado invertido preso em um suporte feito por uma placa de ferro de 2Kg, essa placa foi sustentada por 4 colunas de alumínio e a base das colunas foram fixadas na mesa óptica como demonstrado na figura 5-21.

Figura 5-21: *Mini shaker* fixado invertido

O suporte vibratório foi dotado de um parafuso com uma ponteira feita de PVC de 3mm com rosca para que possam ser utilizadas diversas alturas. Os sensores foram fixados então logo abaixo da ponteira em contato como pode ser visto na figura 5-22.

Figura 5-22: Posicionamento do sensor

Para ser determinada a resposta, foi definido o tempo inicial da medição como partindo de 10% e o tempo final como 90% do valor final de acomodação e vice-versa, caracterizando então um tempo de subida e descida. Adquirindo simultaneamente a saída do gerador de sinais gerando uma onda quadrada de 10 Hz com 2,4 Volts de amplitude e desconectando os capacitores que realizam a filtragem dos sensores foram obtidas as respostas vistas nas figuras 5-23 e 5-24.

Figura 5-23: Medição do tempo de subida e descida do *Fiber taper*

O tempo de subida e descida foi calculado como aproximadamente 18ms e 16ms como demonstrado na tabela 5-4.

Tabela 5-4: Medição do tempo de subida e descida do *Fiber taper*

Tempo de resposta do <i>Fiber taper</i>					
	Tensão (V)	Tempo (s)		Tensão (V)	Tempo (s)
10%	0,24	3,539	10%	0,24	3,59
90%	2,16	3,557	90%	2,16	3,606
Tempo de subida		0,018	Tempo de descida		0,016

Figura 5-24: Medição do tempo de subida e descida do FSR 402

O tempo de subida e descida foi calculado como aproximadamente 19ms e 18ms como demonstrado na tabela 5-5.

Tabela 5-5: Medição do tempo de subida e descida do FSR 402

Tempo de resposta do <i>Force sensing resistor</i>					
	Tensão (V)	Tempo (s)		Tensão (V)	Tempo (s)
10%	0,24	3,573	10%	0,24	3,622
90%	2,16	3,592	90%	2,16	3,64
Tempo de subida		0,019	Tempo de descida		0,018

Após a análise de dados, foi notado que o tempo de resposta dos sensores está muito lento e não condiz com os valores encontrados no *datasheet* do *Force sensing resistor*, onde o tempo de resposta está definido como $t < 1\sim 2ms$ [48].

Para realizar o primeiro experimento foi desconsiderado o tempo de resposta do próprio *mini shaker*, porém é possível notar-se que ele não é desprezível e necessita a devida atenção.

Para obter-se o tempo de resposta do *mini shaker*, foi utilizada a configuração demonstrada na figura 5-25.

Figura 5-25: Montagem para determinação da resposta do *mini shaker*

Excitando o *Mini shaker* a partir do gerador de função, a variação da posição da ponta fixada no equipamento causa uma interferência luz obtida pelo medidor. Essa variação após obtida é comparada com o sinal que excita o *Shaker*, obtendo assim o tempo de resposta equipamento, demonstrado na figura 5-26.

Figura 5-26: Medição do tempo de subida e descida do *mini shaker*

O tempo de subida e descida foi calculado como aproximadamente 19ms e 16ms como demonstrado na tabela 5-6.

Tabela 5-6: Medição do tempo de subida e descida do *mini shaker*

Tempo de resposta do Mini Shaker					
	Tensão (V)	Tempo (s)		Tensão (V)	Tempo (s)
10%	0,24	3,602	10%	0,24	3,655
90%	2,16	3,621	90%	2,16	3,671
Tempo de subida		0,019	Tempo de descida		0,016

Colocando os valores obtidos lado a lado é possível notar a proximidade dos valores e chegar a conclusões sobre o tempo de resposta. Ambos os sensores são tão rápidos em relação à resposta do *mini shaker*, que a resposta por eles dada é praticamente a própria resposta do *mini shaker* como demonstrado na tabela 5-7. Como nas medições da resposta do *mini shaker* os movimentos foram feitos sem restrições causadas por corpos (sensores, mesa, etc) é coerente que o tempo levado seja superior devido à grande excursão da ponteira utilizada quando comparado por movimentações restringidas.

Tabela 5-7: Cálculo dos tempos de resposta

Tempo de resposta do Mini Shaker			
Tempo de subida	19ms	Tempo de descida	16ms
Tempo de resposta do <i>Fiber taper</i>			
Tempo de subida	18ms	Tempo de descida	16ms
Tempo de resposta do FSR 402			
Tempo de subida	19ms	Tempo de descida	18ms

Embora não tenha sido possível determinar com precisão os tempos de resposta pelas limitações da configuração e equipamentos escolhidos, é possível delimitar despretensiosamente que o tempo de resposta dos sensores é de $t < 1\sim 2ms$ como estabelecido no manual [48].

5.8 CARACTERÍSTICAS DE HARMON (1982)

I. Maleabilidade e durabilidade

A superfície do sensor é sim maleável e durável, pois foi utilizado silicone para receber a força exercida, o que com sua elasticidade não mantém a deformação após cessar a mesma. É necessário, no entanto realizar estudos sobre a vida útil do silicone e sua dureza com o tempo e sua histerese com a deformação prolongada.

II. Estabilidade, repetibilidade e histerese

- Estabilidade

Ambos os sensores apresentam certo nível de instabilidade quando altos ganhos são utilizados. O *Force sensing resistor* apresentou oscilação nas medidas e o sensor *Fiber taper* apresentou algumas vezes oscilação do *offset*, causando deslocamento do zero da escala.

- Repetibilidade

Para a obtenção da repetibilidade foi utilizada a mesma montagem com o *mini shaker*, porém foi utilizada uma entrada senoidal de 10Hz e foi mantido um tempo para aquisição de amostras de 50 segundos. Após a aquisição das senóides pelo sensor de fibra e o *Force sensing resistor* foram selecionados pontos equivalentes da senóide e foram feitos o cálculo dos erros.

Figura 5-27: Conjuntos de pontos para cálculo do erro médio

Para cada conjunto de pontos foi calculada a média e o erro dos pontos em relação à média utilizando a equação 5.10.

$$\text{Erro médio da amostra} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{|a_i - \bar{a}|}{\bar{a}}}{n} \quad (5.10)$$

Foram então calculados os erros médios de um número de amostras de modo que fosse abrangido um período inteiro da senóide como demonstrado na figura 5-28.

Figura 5-28: Escolha de pontos abrangendo um período inteiro

E finalmente a média de todos os erros de todos os conjuntos de amostras e os erros médios totais comparados. Pela figura 5-29 pode-se ver claramente que o erro do *Fiber taper* é inferior ao do FSR 402.

Figura 5-29: Erros médio de cada conjunto de amostras e erros médios totais

Foi obtido então:

Tabela 5-8: Erros médios do *Fiber taper* e do *Force sensing resistor*

Erro de medição do <i>Fiber taper</i>	Erro de medição do FSR 402
0,2161%	0,3082%

É possível dizer então que o *Fiber taper* possui um erro inferior ao do FSR 402 e consequentemente mais precisão.

- Histerese

Para altos valores de força exercida tanto no FSR 402 quanto no *Fiber taper*, temos uma deformação maior o que acaba elevando o tempo necessário para que se retorne ao repouso e consequentemente a medição chegar ao zero, porém para pequenas deformações a histerese é quase imperceptível, indo à zero quase que instantaneamente, não causando grande impacto.

III. Resposta monotônica

Ambos os sensores possuem uma resposta monotônica, isto é, não possuem dois valores iguais para medidas diferentes e sua variação apenas incrementa ou decrementa.

6 CONCLUSÃO

6 CONCLUSÃO

☑ Verificou-se que o sensor com *Fiber taper* possui uma resposta quase linear e o FSR 402 responde de maneira logarítmica tendendo para polinomial quadrática como é possível ver na figura 6-1 e 6-2.

Figura 6-1: Junção de todas as retas do sensor de *Fiber taper*

Figura 6-2: Junção de todas as curvas do FSR 402

☑ Para as medições com o sensor de *Fiber taper* foram obtidas as seguintes sensibilidades vistas na tabela 6-1:

Tabela 6-1: Valores de sensibilidade determinados para as medições do *Fiber taper*

	Sensibilidade
100g	99,7mV / g
1000g	9,9mV / g
2000g	5,6mV / g
3000g	3,2mV / g

- ☑ Para as medições com FSR 402 foram obtidas as seguintes sensibilidades vistas na tabela 6-2:

Tabela 6-2: Valores de sensibilidade determinados para posições distintas das medições do FSR 402

	$\Delta s1$	$\Delta s2$	$\Delta s3$	$\Delta s4$
100g	169mV / g	10,2mV / g	6,58mV / g	4,57mV / g
1000g	66,4mV/g	4,93mV / g	5,29mV / g	2,85mV / g
2000g	63,5mV / g	2,15mV / g	2,56mV / g	1,19mV / g
3000g	75mV / g	1,47mV / g	1,52mV / g	678uV / g

- ☑ Foi concluído que o sensor com *Fiber taper* responde a valores de força de até 1 grama enquanto o FSR 402 detecta forças à partir de 15 gramas.

- ☑ Embora o valor máximo de força utilizado em experimentos foi 3Kg, o valor máximo de força suportado pelo FSR 402 está definido na no manual como 10Kg. O máximo valor medido utilizando o sensor de *Fiber taper* foi de também 3Kg, porém esse valor foi delimitado com o intuito de evitar danos ao sensor.

- ☑ Observou-se que os sensores possuem tempo de resposta relativamente próximos e pela limitação causada pela escolha dos materiais e métodos não foi possível determinar com precisão, no entanto foi definido como $t < 1\sim 2ms$, valor pré-estabelecido no *datasheet* do FSR 402.

- ☑ Ambos os sensores são maleáveis e duráveis podendo suportar um alto número de atuações.

- ☑ Ambos os sensores são estáveis e podem ser utilizados em medições.

- ☑ Os erros dos dois sensores podem ser vistos na tabela 6-3:

Tabela 6-3: Erros médios do *Fiber taper* e do *Force sensing resistor*

Erro de medição do <i>Fiber taper</i>	Erro de medição do FSR 402
0,2161%	0,3082%

É possível dizer então que o *Fiber taper* possui um erro inferior ao do FSR 402 e consequentemente mais precisão.

☑ Ambos os sensores não possuem histerese significativa para baixas intensidades de força, no entanto ao sofrerem grande deformação tendem a demorar um pouco mais que o tempo médio para retornar ao repouso. São necessários então, estudos futuros utilizando intensidades de força elevadas para analisar a dimensão da histerese.

☑ Ambos os sensores possuem resposta monotônica.

Esta pesquisa teve como foco, análise e implementação de um sensor de força óptico utilizando *Fiber tapers* baseando-se nos trabalhos de Massaro et al. (2010). Com pequenas modificações foi possível alcançar um resultado próximo do exposto no trabalho mantendo suas qualidades.

Mudando a fibra de SiO₂ para PMMA há uma redução no custo e uma redução na complexidade de realização do *fiber tapering*, e empregando uma alternativa que descarta o uso de nanopartículas há uma diminuição no custo de implementação e uma simplificação no princípio físico que resulta na atenuação da luz no sensor.

Com a criação deste sensor de custo baixo e alta confiabilidade surgem inúmeras possibilidades para seu uso em sistemas que necessitam o *feedback* de força, pressão e peso e por ter suas dimensões reduzidas pode ser utilizado até mesmo em situações em que se é necessário extrema delicadeza e destreza como em cirurgias minimamente invasivas.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Baseando-se no fato de que é necessário um *array* de sensores para que seja possível uma localização espacial, são necessários estudos sobre como realizar essa junção. Aqui é vista uma dificuldade, pois não é possível fazer dois sensores em série com a mesma fibra dado que a pressão causa atenuação da luz e não seria possível diferenciar qual elemento tátil estaria sofrendo pressão.

Embora a configuração utilizada por Gupta (1996) proporcione facilidade em inserir e obter o sinal, ainda há complicações uma vez que é necessária até o presente momento a utilização de um sensor de *Fiber taper* para elemento tátil. Para a criação de uma matriz 4 x 4 é necessário um *bundle* (conjunto de fibras) de 6,28mm², o que para apenas 16 sensores já seria um valor elevado. É necessário então experimentar a redução do diâmetro da fibra utilizada 0,5mm para 0,25mm.

O tamanho utilizado no molde para a criação do sensor foi de 15mm por ser aproximadamente as dimensões do sensor comercial utilizado para a comparação, porém não são necessárias essas dimensões pois o sensor reage apenas com deformações mais próximas do centro onde está localizado o *Fiber taper*, no entanto é necessário um mínimo de silicone para além de ocorrer o efeito da frustração, ser fornecida também uma estrutura para abrigar o *Fiber taper*. Com a redução também haverá uma sensibilidade ainda maior já que a tensão exercida no silicone será por uma quantidade de área menor, aumentando a pressão e conseqüentemente a deformação.

O silicone utilizado possui *shore A* (15), essa característica define os limites inferior e superior da faixa de operação, diminuindo então a dureza é possível obter mais sensibilidade e aumentando-a é possível utilizar o sensor até mesmo para balanças.

Para sistemas em que é necessária a transmissão de informação a longa distância pode se fazer o uso do sensor proposto, além da utilização de fibras plásticas para a transmissão, pode-se fazer conexões e utilizar fibras de sílica que possuem atenuação inferior e conseqüentemente um alcance ainda maior do sinal.

REFERÊNCIAS

- [1] MASSARO, A., SPANO, F., CAZZATO, P., CINGOLANI, R., ATHANASSIOU, A. (2011). Real time optical pressure sensing for tactile detection using gold nanocomposite material. **Microelectronic Engineering**, v. 88, n. 8, p. 2767-2770.
- [2] YANIGER, S. I. Force Sensing Resistors: A Review Of The Technology. **Electro International**, 1991, 1991, 16-18 April 1991. p. 666-668.
- [3] BARSKY, M. F.; LINDNER, D. K.; CLAUS, R. O. (1989). Robot gripper control system using PVDF piezoelectric sensors. **Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on**, v. 36, n. 1, p. 129-134.
- [4] CASTELLI, F. (2002). An integrated tactile-thermal robot sensor with capacitive tactile array. **Industry Applications, IEEE Transactions on**, v. 38, n. 1, p. 85-90.
- [5] ALI, B.; AYUB, M.; YUSSOF, H. (2012). Characteristics of a New Optical Tactile Sensor for Interactive Robot Fingers. **International Journal of Social Robotics**, v. 4, n. 1, p. 85-91.
- [6] ARREGUI, F. J.; MATÍAS, I. R.; LÓPEZ-AMO, M. (2000). Optical fiber strain gauge based on a tapered single-mode fiber. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 79, n. 2, p. 90-96.
- [7] NICHOLLS, H. R.; LEE, M. H. (1989) A survey of robot tactile sensing technology. **The International Journal of Robotics Research**, v. 8, n. 3, p. 3-30.
- [8] LENT, R; (2004). Os detectores do ambiente. In:_____. **Cem Bilhões de Neurônios?**. 3.ed. Brasil: Editora Atheneu. Cap. 6, p. 183-227.
- [9] PURVES, D.; AUGUSTINE, G. J.; FITZPATRICK, D.; HALL, W. C.; LAMANTIA, A. S.; MCNAMARA, J. O.; WILLIAMS, M. W. (2004). The Somatic sensory system. In:_____. **Neuroscience**. 3.ed. Estados Unidos da América: Sinauer Associates. Cap. 8, p. 189-194.

- [10] WESTLING, G.; JOHANSSON, R. S. (1984). Factors influencing the force control during precision grip. **Experimental Brain Research**, v. 53, n. 2, p. 277-284.
- [11] NAGASAKO, E. M.; OAKLANDER, A. L.; DWORKIN, R. H. (2003). Congenital insensitivity to pain: an update. **Pain**, v. 101, n. 3, p. 213-219.
- [12] SUZUKI, K., AKAMA, T., KAWASHIMA, A., YOSHIHARA, A., YOTSU, R. R., ISHII, N. (2012). Current status of leprosy: epidemiology, basic science and clinical perspectives. **The Journal of dermatology**, v. 39, n. 2, p. 121-129.
- [13] JONES, L. A.; LEDERMAN, S. J. (2006). Tactile Sensing. In: _____. **Human hand function**. Estados Unidos da América: Oxford University Press. Cap. 4. p. 44-74
- [14] AGNIHOTRI, A. K., PURWAR, B., JEEBUN, N., AGNIHOTRI, S. (2006). Determination of sex by hand dimensions. **The Internet Journal of Forensic Science**, v. 1, n. 2, p. 12-24.
- [15] JOHANSSON, R. S.; VALLBO, Å. B. (1979). Tactile sensibility in the human hand: relative and absolute densities of four types of mechanoreceptive units in glabrous skin. **The Journal of physiology**, v. 286, n. 1, p. 283-300.
- [16] BELL, J.; BOLANOWSKI, S.; HOLMES, M. H. (1994). The structure and function of Pacinian corpuscles: A review. **Progress in neurobiology**, v. 42, n. 1, p. 79-128.
- [17] ASIMOV, I. (1982). **Asimov explica**. 2.ed. Brasil: Francisco Alves. p. 107-108.
- [18] BRASIL. INMETRO. Instituto Nacional de Metrologia. Portaria INMETRO/ VIM número 232 de 08/05/2012 - **Vocabulário Internacional de metrologia – Conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2012)**.

- [19] KATZ, D. (2015). Applications of the wave model. In:_____. **Physics for Scientists and Engineers: Foundations and Connections**. Estados Unidos da América: Cengage Learning. Cap. 36, p. 1155-1176
- [20] LVOVSKY, Alexander I. (2003). Fresnel Equations. In:_____. **Encyclopedia of Optical Engineering**. Estados Unidos da América: Taylor and Francis. p. 1-6.
- [21] ZANELLA, F. P. et al (2003). Frustrated total internal reflection: A simple application and demonstration. **American Journal of Physics**, v. 71, p. 494-496.
- [22] JEFFERSON, Y. H. (2005). Low-cost multi-touch sensing through frustrated total internal reflection. In: **Proceedings of the 18th annual ACM symposium on User interface software and technology**. ACM. p. 115-118. Seattle, Estados Unidos da América.
- [23] TEICH, M. C.; SALEH, B. E. A. (1991) Fiber Optics. In:_____. **Fundamentals of Photonics**. Estados Unidos da América: Wiley Interscience. Cap. 8, p. 272-309.
- [24] SNYDER, A. W.; LOVE, J. (2012). Ray analysis of multimode optical waveguides. In:_____. **Optical waveguide theory**. Austrália: Chapman & Hall. Cap. 1, p. 3-189.
- [25] MURPHY, J. A. (1990). **Evanescent wave spectroscopy using multimode optical fibres**. Tese de Doutorado. Dublin City University.
- [26] MIT OpenCourseWare. **Fiber optics Fundamentals | MIT Understanding Lasers and Fiber optics**. Disponível em:<<https://youtu.be/jy9VSNXkx4>>. Acesso em: 05. dez. 2015.
- [27] CHAKRABARTI, P. (2015). Mode Analysis for Optical Fibers. In:_____. **Optical Fiber Communication**. Índia: McGraw Hill Education (India) Private Limited. Cap. 3.

- [28] GUPTA, B. D.; DODEJA, H.; TOMAR, A. K. (1996). **Fibre-optic evanescent Field absorption sensor based on a U-shaped probe. Optical and Quantum Electronics.** n. 28, p. 1629-1639.
- [29] BIRKS, T. A.; LI, Y. W. (1992). The shape of Fiber tapers. **Journal of Lightwave Technology.** v. 10, n. 4, p. 432-438
- [30] OGAWA, Y. (2011). Method of fabricating high transmission optical tapered fiber. **Annual report on research activities in Tanabe Photonic Structure Group, Keio University.** v. 1, p. 6-8.
- [31] HARUN, S. W. et al. (2013) Theoretical analysis and fabrication of tapered fiber, Optik. **International Journal for Light and Electron Optics.** v. 124, n. 6, p. 538-543.
- [32] TAKEUCHI, Y.; NODA, J. (1992). Novel Fiber coupler Tapering Process Using a Microheater. **Photonics Technology Letters, IEEE** , v.4, n.5, p. 465-467.
- [33] HADDOCK, H. S.; SHANKAR, P. M.; MUTHARASAN, R. (2003). Fabrication of biconical tapered optical fibers using hydrofluoric acid. **Materials Science & Engineering. B. Solid-state materials for advanced technology.** v. 97, n. 1, p. 87-93.
- [34] KBASHI, H. J. (2012) Fabrication of submicron-diameter and taper fibers using chemical etching. **Journal of Materials Science & Technology.** v. 28, n. 4, p. 308-312
- [35] KIEU, K. Q.; MANSURIPUR, M. (2006). Biconical Fiber taper sensors. **IEEE Photonics Technology Letters.** V. 18, n. 21/24, p. 2239-2241.
- [36] TIAN, Y. et al. (2011). Tapered optical fiber sensor for label-free detection of biomolecules. **Sensors.** v. 11, n. 4, p. 3780-3790.
- [37] DONLAGIC, D. (2006). In-line higher order mode filters based on long highly uniform Fiber tapers. **Journal of Lightwave Technology.** v. 24, n. 9, p. 3532-3539.

- [38] FIELDING, A. J.; DAVIS, C. C. (2002). Tapered single-mode optical fiber evanescent coupling. **Photonics Technology Letters, IEEE**. v. 14, n. 1, p. 53-55.
- [39] RAGDALE, C. M.; PAYNE, D. N. (1983). Single-mode fused biconical taper fibre coupler. **IEE Colloquium Conference in Optical Fibre Sensors**. p. 75-78.
- [40] IAIN, D. C. (2012). Refraction, evanescent waves, and plasmons. In:_____. **Biophysical Techniques**. Estados Unidos da América: Oxford University Press. Cap. 4.1, p. 107-118.
- [41] DE FORNEL, F. (2001). Total Internal Reflection. In:_____. **Evanescent waves: from Newtonian optics to atomic optics**. Springer Science & Business Media. Cap. 4, p. 5-29.
- [42] Sixty Symbols. **Total Internal Reflection - Sixty Symbols**. Disponível em:<<https://youtu.be/5BPC9fWqkDw>>. Acesso: 06.dez.2015
- [43] MÓZES, G. (1983). Chemical, crystallographical and physical properties of liquid paraffins and paraffin waxes. In:_____. **Paraffin products**. Estados Unidos da América: Elsevier. Cap. 1, p. 13-140
- [44] BOHREN, C. F.; HUFFMAN, D. R. (2008). Electromagnetic Theory. In:_____. **Absorption and scattering of light by small particles**. República Federal da Alemanha: John Wiley & Sons. Cap.2, p. 12-56.
- [45] ROSSITER, B. W.; BAETZOLD, R. C. (1993). Techniques for the study of adsorption from solution. In:_____. **Physical Methods of Chemistry, Investigations of Surfaces and Interfaces - Part A**. Estados Unidos da América: John Wiley & Sons. v. 9, Cap. 2.
- [46] RANA, N. K. (2009). Application of force sensing resistor (FSR) in design of pressure scanning system for plantar pressure measurement. In: **Computer and Electrical Engineering, 2009. ICCEE'09. Second International Conference on**. IEEE, 2009. p. 678-685.

[47] VAN DEN HEEVER, D. J.; SCHREVE, K.; SCHEFFER, C. (2009). Tactile sensing using force sensing resistors and a super-resolution algorithm. **Sensors Journal**, IEEE, v. 9, n. 1, p. 29-35.

[48] Force Sensing Resistor Integration Guide and Evaluation Parts Catalog. **Interlink Electronics**. Disponível em:<
<https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Pressure/fsrguide.pdf>>. Acesso: 03/01/2016.

[49] MALVINO, A. P. (1987). Circuitos Lineares com AmpOp. In:_____. Eletrônica Volume 2. 2.ed. Brasil: **McGraw-Hill**. Cap. 20, p. 173-220.

[50] BPW34 Product Information. **Vishay Semiconductors** (2011). Disponível em:<
<http://www.vishay.com/docs/81521/bpw34.pdf>>. Acesso: 03/01/2016.

[51] Ficha técnica Silicone acético Adexx. **Poliplás** (2015). Disponível em:<
<http://www.poliplas.com.br/adm/arquivos/portfichatecnicaadexxsiliconepoliplas2015.pdf>>. Acesso: 03/01/2016

REFERÊNCIAS

Apêndice 1: Circuito eletrônico completo

Apêndice 2: Tabela de tensão obtidas ajustando 10g para 10V utilizando o *Fiber taper*

Força 100g – Ponta de 3mm – <i>Fiber taper</i>		
Tempo (s)	Tensão (V)	Força (g)
26,07	0,232	5
37,73	0,4062	10
49,75	0,7407	15
57,32	1,062	20
66,48	1,471	25
75,2	1,876	30
83,93	2,407	35
104,9	2,823	40
115,1	3,331	45
123,6	4,044	50
131,3	4,672	55
137,09	5,224	60
144	5,63	65
153	6,175	70
162	6,642	75
169	7,415	80
177	7,688	85
182,7	8,231	90
188	8,649	95
193	9,156	100

Apêndice 3: Tabela de tensões obtidas ajustando 1000g para 10V utilizando o *Fiber taper*

Força 1000g – Ponta de 5mm – <i>Fiber taper</i>		
Tempo (s)	Tensão (V)	Força (g)
26,28	0,2224	50
38,94	0,4393	100
49,6	0,7226	150
56,92	1,06	200
66,02	1,485	250
75,34	1,863	300
85,23	2,443	350
104,9	2,81	400
115	3,354	450
122,9	4,046	500
131	4,677	550
137,8	5,255	600
143,9	5,632	650
154	6,194	700
162	6,651	750
170	7,147	800
177,2	7,698	850
182,9	8,259	900
188	8,665	950
193,7	9,18	1000

Apêndice 4: Tabela de tensões obtidas ajustando 2000g para 10V utilizando o *Fiber taper*

Força 2000g – Ponta de 10mm – <i>Fiber taper</i>		
Tempo (s)	Tensão (V)	Força (g)
14,48	0,1768	100
25,4	0,4846	200
39,68	0,9991	300
50,94	1,558	400
60,97	2,337	500
69,71	2,785	600
77,74	3,337	700
87,65	3,931	800
94,3	4,443	900
104,1	5,13	1000
112	5,724	1100
117	6,285	1200
131,9	7,021	1300
145	7,419	1400
154	8,024	1500
161,6	8,601	1600
168,8	9,012	1700
174,3	9,431	1800
19,6	9,876	1900
185,6	10,31	2000

Apêndice 5: Tabela de tensões obtidas normalizando 10V para 3000g utilizando o *Fiber taper*

Força 3000g – Ponta de 10mm – <i>Fiber taper</i>		
Tempo (s)	Tensão (V)	Força (g)
39,89	0,03299	150
51,43	0,3526	300
62,42	0,9305	450
71,29	1,468	600
79,96	2,008	750
88,86	2,552	900
101,5	3,25	1050
109	3,744	1200
123,9	4,356	1350
133,7	4,856	1500
144,9	5,35	1650
156,6	5,833	1800
167,2	6,207	1950
175,5	6,584	2100
187,7	7,036	2250
196,3	7,492	2400
205,5	7,888	2550
212,9	8,303	2700
218,2	8,581	2850
233,7	8,97	3000

Apêndice 6: Tabela de tensões obtidas ajustando 100g para 10V utilizando o FSR 402

Força 100g – Ponta de 3mm - FSR 402		
Tempo (s)	Tensão (V)	Força (g)
5,95	0	5
11,9	0	10
17,85	0	15
23,8	0	20
29,75	2,676	25
39,58	4,388	30
48,38	5,013	35
60,59	5,219	40
65,35	5,81	45
81,25	6	50
91,84	6,67	55
103	6,807	60
111,2	7,032	65
122,7	7,152	70
158,9	7,841	75
166,4	7,985	80
173,7	8,109	85
182,1	8,544	90
187,3	8,625	95
193,7	9,235	100

Apêndice 7: Tabela de tensões obtidas normalizando 10V para 1000g utilizando o FSR 402

Força 1000g – Ponta de 5mm - FSR 402		
Tempo (s)	Tensão (V)	Força (g)
16,66	1,144	50
30,54	2,587	100
43,51	3,546	150
55,66	4,367	200
63,77	5,242	250
84,65	6,026	300
98,07	6,555	350
110,7	7,206	400
7,546	7,546	450
134,3	8	500
143,7	8,36	550
153,1	8,661	600
164,8	9,012	650
173,5	9,167	700
177,3	9,22	750
185	9,396	800
193,6	9,606	850
201,6	9,742	900
216,3	9,948	950
224,5	9,986	1000

Apêndice 8: Tabela de tensões obtidas normalizando 10V para 2000g utilizando o FSR 402

Força 2000g – Ponta de 10mm - FSR 402		
Tempo (s)	Tensão (V)	Força (g)
25,85	2,818	100
36,73	3,801	200
48,99	4,389	300
56,9	4,855	400
65,8	5,453	500
74,87	5,89	600
84,05	6,444	700
95,56	7,017	800
105,8	7,5666	900
115,8	8,008	1000
122	8,378	1100
131,9	8,674	1200
139,6	8,977	1300
148,7	9,207	1400
154,6	9,404	1500
163,8	9,591	1600
168,1	9,72	1700
174,6	9,846	1800
179,2	9,96	1900
184,2	10,2	2000

Apêndice 9: Tabela de tensões obtidas normalizando 10V para 3000g utilizando o FSR 402

Força 3000g – Ponta de 10mm - FSR 402		
Tempo (s)	Tensão (V)	Força (g)
18,69	3,373	150
29,41	4,269	300
39,71	4,953	450
50,05	5,497	600
63,89	6,117	750
77,45	6,969	900
86,85	7,487	1050
99,8	8,012	1200
108,2	8,365	1350
117,6	8,68	1500
127,8	8,9	1650
137,7	9,122	1800
154,1	9,399	1950
161,5	9,485	2100
168,9	9,616	2250
176,3	9,693	2400
183,7	9,839	2550
191,1	9,914	2700
198,5	10,02	2850
205,9	10,1	3000

Apêndice 10: Tabela de tensões obtidas normalizando 10V para 30g utilizando o *Fiber taper*

Força 30g – Ponta de 3mm – <i>Fiber taper</i>		
Tempo (s)	Tensão (V)	Força (g)
13,19	0,07423	1
16,97	0,2853	2
19,5	0,4946	3
22,16	0,6696	4
26,68	1,1	5
29,79	1,395	6
32,21	1,644	7
34,28	1,798	8
39,88	2,427	9
42,52	2,672	10
45,13	2,894	11
48,65	3,29	12
50,45	3,656	13
52,13	3,903	14
54,44	4,194	15
61,29	4,844	16
61,84	4,959	17
63,57	5,248	18
66,46	5,577	19
69,9	5,905	20
71,49	6,018	21
74,17	6,513	22
76,98	6,902	23
77,56	6,984	24
79,17	7,288	25
83,01	7,792	26
7,919	7,919	27
85,48	7,991	28
89,27	8,451	29
94,65	8,809	30