

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

Relatório Final
Trabalho de Graduação I

Sistema de sensoriamento óptico aplicado a manipuladores flexíveis

Autor: **Matheus dos Santos Rodrigues**

Orientador: **Prof. Dr. Eric Fujiwara**

Campinas, abril de 2022

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

Relatório Final
Trabalho de Graduação I

Sistema de sensoriamento óptico aplicado a manipuladores flexíveis

Autor: **Matheus dos Santos Rodrigues**

Orientador: **Prof. Dr. Eric Fujiwara**

Curso: Engenharia de Controle e Automação

Trabalho de Graduação I apresentado à Comissão de Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Engenheiro de Automação e Controle.

Campinas, 2022
S.P. – Brasil

Índice

	Resumo	1
Capítulo 1	Introdução	2
Capítulo 2	Revisão Bibliográfica	4
2.1.	Manipuladores flexíveis	4
2.2.	Fundamentos de fibras ópticas	6
2.3.	Princípios físicos de sensores de fibra óptica	7
2.4.	Sensor de fibra óptica de deformação	10
Capítulo 3	Materiais e Métodos	12
3.1.	Sensor de fibra óptica	12
3.2.	Modelo computacional	13
Capítulo 4	Resultados e Discussões	15
4.1.	Simulações modelo estático	15
Capítulo 5	Cronograma	17
Capítulo 6	Conclusões	18
	Referências Bibliográficas	19

Resumo

O crescente avanço na utilização de atuadores e elementos robóticos flexíveis ocorre devido ao menor custo, maior velocidade de operação, maior eficiência, e pelas aplicações específicas. Esse avanço vem acompanhado com uma necessidade de sensores adequados para o monitoramento desses elementos. Neste contexto, este estudo busca o desenvolvimento de um sensor que atenda às necessidades de um manipulador flexível, com a viabilização da redução da complexidade gerado pela dinâmica do elemento. O trabalho compreenderá a modelagem mecânica e simulação, desenvolvimento de sistema de aquisição e validação do sistema por meio de testes controlados. Ao fim do projeto espera-se obter um sensor eficiente, preciso, de baixa complexidade e baixo custo para o monitoramento e controle de manipuladores flexíveis.

Palavras Chave: Sensor de fibra óptica, manipuladores, processamento de sinais, aprendizado de máquina.

Capítulo 1

Introdução

A necessidade de sensores adequados para a monitoramento de elementos flexíveis vem ganhando importância desde os anos 80, devido a necessidade de controle de alta precisão de robôs leves com aplicações industriais e espaciais (Fig 1.1). Uma área que vem ganhando destaque atualmente, e por muitos considerada o próximo estágio da robótica, é *soft robotics*, onde os elementos robóticos apresentam propositalmente baixa rigidez mecânica para desempenharem tarefas especiais [1].



Figura 1.1: Braço robótico preso a estação internacional espacial (NASA).

Visto que em grande parte das aplicações clássicas é desejado resistência mecânica elevada, no geral são utilizados metais de alta rigidez na fabricação de robôs. O aço, por exemplo, apresenta coeficiente de young de $200 \cdot 10^9 \text{ N}^2/\text{m}$ enquanto que o poliestireno apenas $3 \cdot 10^9 \text{ N}^2/\text{m}$; no entanto, o aço possui densidade quase oito vezes maior que o polímero. Em comparação com os robôs rígidos pesados e volumosos convencionais, os manipuladores de link flexível têm a vantagem potencial de menor custo, maior velocidade operacional, maior relação carga útil / peso do manipulador, atuadores menores, menor energia consumo, melhor manobrabilidade, melhor transportabilidade e operação mais segura devido à redução da inércia [2][3]. Porém, a maior desvantagem desses manipuladores é o problema de vibração devido à baixa rigidez [3]. O comportamento oscilatório do manipulador flexível deve ser considerado principalmente durante a operação devido à flexibilidade de seus links. Devido à natureza flexível do sistema, as dinâmicas são altamente não lineares e complexas.

Essa classe de manipuladores encontra espaço em meio a materiais naturalmente flexíveis como polímeros, e materiais avançados como hidrogéis de propriedades mecânicas convenientes à robótica, como resistência a fadiga e auto recuperação [4][5]. No entanto,

tais elementos não estão restritos apenas a esses grupos de materiais. A constante de rigidez de uma viga homogênea esbelta pode ser aproximada pela relação:

$$k_v = \frac{3EI}{L^3} \quad (\text{N.m}^{-1}) \quad \text{Equação 1.1}$$

onde k_v é a constante de rigidez da viga, em N.m^{-1} ; E é o módulo de elasticidade do material, em N^2/m ; I é o momento de inércia da seção transversal, em m^4 ; L é o comprimento da viga, em m. Observa-se que a rigidez equivalente decresce rapidamente com o aumento do comprimento. Assim, mesmo um elemento fabricado de material rígido pode apresentar comportamento flexível para dimensões suficientemente grandes; característica comum a satélites, aeronaves e até mesmo a algumas estruturas fixas.

Nesse contexto, sensores de fibra óptica podem ser uma alternativa aos comumente utilizados Piezo-Transistores (PZT)[6]. Muller et. al demonstrou ser possível a utilização de Fiber Bragg Grating (FBG) [7] para o controle de vibrações em estruturas, sendo possível medir tensão mecânica em várias partes da estrutura com apenas uma fibra óptica [8]. Assim, com o uso de um sensor óptico, seria possível viabilizar o monitoramento e controle de manipuladores flexíveis, diminuindo a complexidade através do número reduzido de canais, no entanto com a possibilidade de obter um sinal com a contribuição de todas as partes do elemento; contrastando com os sensores PZT.

Este estudo busca o desenvolvimento de um sensor de fibra óptica que atenda às necessidades de um manipulador flexível, utilizando técnicas de sensoriamento e processamento que proporcionem uma redução da complexidade do sistema gerado pela dinâmica do elemento. Assim, ao fim do projeto espera-se obter um sistema de sensoriamento eficiente, preciso, de baixa complexidade, e baixo custo para o monitoramento e controle de manipuladores flexíveis.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Um sistema de sensoramento para robôs flexíveis possui inúmeros desafios devido às características não lineares de seus elementos constitutivos. Sensores de fibra óptica, por outro lado, podem se aproveitar dessas características para modular a luz propagada ao longo da guia de onda e implementar um monitoramento sensível e acurado. Neste capítulo, as características de manipuladores flexíveis e suas principais técnicas de sensoramento são apresentadas na seção 2.1. Os princípios de funcionamento da fibra óptica é explorado na seção 2.2. Na seção 2.3, são apresentados os principais mecanismos físicos de modulação mecânica de sensores de fibra. Por fim, na última seção são abordados os sensores de fibra óptica de deformação.

2.1 Manipuladores flexíveis

Manipuladores robóticos convencionais são projetados com altíssima rigidez mecânica a fim de minimizar vibrações e ser possível obter com alta precisão a posição da extremidade do manipulador. Tais manipuladores são projetados com materiais de alta densidade, e acabam demandando grande potência para seu funcionamento. Apesar disso, se o elemento robótico for suficientemente longo e/ou trabalhar em altas velocidades com cargas elevadas ainda existirá vibração. Por outro lado, manipuladores flexíveis são projetados para serem leves, com uma razão peso-esforço baixa e para trabalhar em altas velocidades.

Robôs flexíveis possuem vantagens não somente em sua dinâmica, mas também na sua fabricação, uma vez que eles podem ser construídos com materiais de baixo custo através de técnicas pouco complexas ou mesmo com impressão 3D. Existem inúmeras aplicações na indústria aeroespacial, manufatura e biomédica. De Caruel et. al (2000) e Min et.al (2003) exploraram os aspectos dinâmicos e estratégias de controle de robôs flexíveis no espaço [9, 10]. Na indústria química e de semicondutores, onde é demandada grande precisão, Weimin et. al (2006) conduziu um estudo de supressão de vibrações com um robô SCARA [11]. Manipuladores flexíveis podem ser usados ainda em ambientes hospitalares em operações cirúrgicas assistidas por robôs [12].

Apesar das inúmeras vantagens dos manipuladores flexíveis em relação aos seus pares rígidos, grandes são os desafios de projeto devido ao seu comportamento dinâmico não linear; que geram baixa acurácia no controle de trajetória e posicionamento. Robôs rígidos armazenam energia cinética em função da sua inércia e energia potencial

gravitacional em função da sua posição no espaço. Robôs flexíveis também armazenam energia potencial elástica em virtude das deflexões dos seus elementos. *Links* sujeitos a flexão armazenam energia potencial em relação as suas deflexões bem como energia cinética em função da taxa de deflexão. A dinâmica deste elemento pode ser descrita pela equação da viga de Euler-Bernoulli:

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \mu \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = f(x, t) \quad \text{N} \quad \text{Equação 2.7}$$

Esta equação é uma generalização da equação de Euler da viga:

$$EI \frac{d^4}{dx^4} v(x) = q(x) \quad \text{N} \quad \text{Equação 2.8}$$

Um grande desafio na utilização de manipuladores flexíveis está na escolha de um sistema de monitoramento que forneça sinais confiáveis e precisos. Sem uma realimentação adequada da dinâmica do manipulador as estratégias de controle de malha fechada se tornam extremamente complexas e, às vezes, inviáveis. A maioria dos sinais de feedback para manipuladores flexíveis são obtidos a partir do deslocamento da sua ponta, deformação ao longo da viga ou da aceleração da ponta [13]. Alguns dos métodos mais utilizados incluem o uso de câmeras de visão (deslocamento da ponta), *strain gauges* (medição de deformação), acelerômetros e/ou giroscópios (sistemas de navegação por inércia).

Tabela 1: Principais estratégias de sensoriamento de manipuladores flexíveis

Sensor	Vantagens	Desvantagens
<i>Strain Gauges</i>	Simples; Baixo custo;	Sensível a variações de temperatura; Sujeito a ruídos [14]; Interferência Eletromagnética [15]; Medição local de deformação;
Acelerômetros	Alta taxa de feedback; Baixo custo;	Sinal Ruidoso e com vieses [16]; Acumulação de erros;
Sistemas de visão computacional	Confiável; Preciso; Baixo ruído;	Limitada taxa de aquisição; Alto custo computacional de processamento;

As principais técnicas de monitoramento de robôs flexíveis empregadas atualmente são apresentadas resumidamente no que diz respeito às suas vantagens e desvantagens

na Tabela 1. Todos esses métodos de sensoriamento possuem limitações intrínsecas que restringem suas aplicações, ou elevam substancialmente o nível de processamento dos sinais brutos. Um sensor que não possua tantas limitações e que ao mesmo tempo supra os requisitos de confiabilidade, precisão e custo é essencial para o progresso e difusão do uso de manipuladores flexíveis.

2.2 Fundamentos das fibras ópticas

Fibra óptica é um material filamentosos de seção circular que através do princípio de reflexão interna total (RIT) consegue guiar ondas de luz. Sua estrutura, tipicamente, consiste de um núcleo com índice de refração n_1 e um revestimento de índice n_2 , onde $n_2 < n_1$. A luz propagada internamente no núcleo sofrerá reflexão total quando o ângulo de incidência na interface com o revestimento foi maior que o ângulo crítico, θ_c . Este ângulo é determinado a partir dos índices de refração da fibra, conforme a lei de Snell:

$$\theta_c = \arcseno\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (\text{rad}) \quad \text{Equação 2.1}$$

O índice de refração n_2 é ligeiramente inferior ao índice do núcleo, sendo assim, no limite em que $n_2 \rightarrow n_1$ o ângulo crítico dado pela Equação 2.1 tenderia a $\theta_c = \frac{\pi}{2}$. A onda óptica cujo ângulo de incidência é $\sim \left(\frac{\pi}{2} + \theta_c\right)$ é chamado de modo fundamental, enquanto ondas de ângulos menores, mas ainda maiores que o ângulo crítico, são chamados de modos de ordem superior. Fibras que propagam apenas o modo fundamental recebem o nome de monomodo (*Single Mode Fiber* – SMF), enquanto as que transmitem mais modos são chamadas de multimodo (*Multi Mode Fiber* – MMF). É importante ressaltar que a condição do ângulo de incidência ser maior do que o ângulo crítico para guiar a luz na fibra é apenas uma condição necessária, mas não suficiente. A luz propagada deve satisfazer as condições de fase na fronteira entre o núcleo e o revestimento, isto é, o deslocamento de fase da onda entre reflexões sucessivas mantém um múltiplo inteiro de 2π . Somente com ângulos discretos os feixes de luz podem se propagar na fibra. Quando o raio do núcleo é pequeno o suficiente e/ou o passo do índice é baixo o suficiente, apenas o modo fundamental pode se propagar no interior. As características do modo dependem também do comprimento de onda. Uma fibra pode ser uma SMF para comprimentos de onda mais longos, mas torna-se um MMF para comprimentos de onda mais curtos.

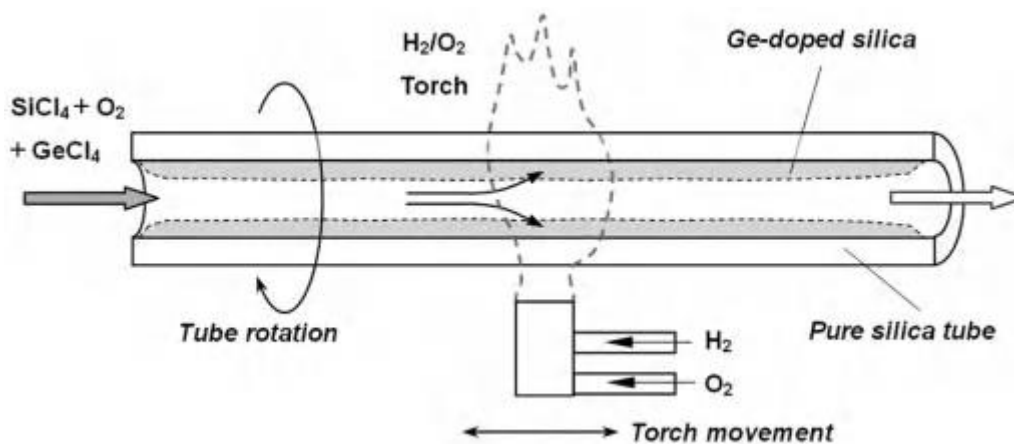


Figura 2.1: Processo de DQVM para uma fibra de sílica [17].

A fibra óptica de sílica é a mais difundida e utilizada tanto para telecomunicação como em equipamentos fotônicos. Sua fabricação é baseada principalmente na tecnologia de deposição química de vapor modificada (DQVM) [18]. No processo, SiO_2 de altíssima pureza é produzido a partir de SiCl_4 puro, que é o material básico da indústria microeletrônica, e sinterizado em uma pré-forma de sílica fundida a uma temperatura de cerca de 1.600°C . Em seguida, o material em alta temperatura é estirado em uma fibra com diâmetro de $\sim 0,1$ mm. Para obter a diferença de índice entre o núcleo e o revestimento, necessário para o fenômeno de reflexão interna total (RIT), o índice do núcleo é ajustado pela dopagem de algumas impurezas especiais na sílica pura, como GeO_2 e P_2O_5 . A Figura 2.1 mostra um diagrama esquemático do processamento de DQVM para uma fibra de sílica dopada com Ge. Outro método importante de fabricação de fibra óptica é chamado método de deposição axial em fase de vapor (*Vapor Axial Deposition* - VAD) [19], que se diferencia por possuir menor custo e maior produtividade que o DQVM. Além disso, a fibra óptica também pode ser composta por um núcleo de sílica pura e um revestimento de sílica dopado com alguns elementos de menor índice, como B_2O_3 . A principal vantagem desta última técnica é que a fibra de sílica pura é considerada como tendo maior confiabilidade a longo prazo.

2.3 Princípios físicos de sensores de fibra óptica

A luz propagada em uma fibra óptica é afetada pelas condições físicas as quais ela está submetida. A sensibilidade da fibra às tais condições é a base para o desenvolvimento dos sensores de fibra óptica e outros dispositivos fotônicos. Os mecanismos de tensão e deformação que realizam modulação no sinal possuem especial importância para este trabalho, então serão abordados em detalhes para fibras monomodo (SMF).

2.3.1 Sensibilidade a deformação axial

Quando uma força é aplicada longitudinalmente à seção transversal de uma fibra ótica ela será tracionada ou comprimida, gerando uma deformação axial. Podemos expressar o estado de tensão-deformação no material através de um tensor. Na ausência de forças cisalhantes, de acordo com a Lei de Hooke, é possível escrever a deformação em função da tensão:

$$\begin{pmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \end{pmatrix} = \frac{1}{E} \begin{pmatrix} 1 & -\nu & -\nu \\ -\nu & 1 & -\nu \\ -\nu & -\nu & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \end{pmatrix} \quad (\text{m/m}) \quad \text{Equação 2.2}$$

Onde e_x , e_y e e_z são as deformações causadas pelas tensões σ_x , σ_y e σ_z aplicadas à fibra; E é o módulo de Young do material; ν é o coeficiente de Poisson do material. Se o filamento é tracionado por uma força externa sua seção transversal encolhe; o inverso ocorre quando em compressão. Uma fibra ótica de sílica possui $E = 6,5 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$ e $\nu = 0,17$ [20]. Quando a carga externa é composta por uma força axial, teremos $\sigma_x = \sigma_y = 0$ e $\sigma_z = F/A$, onde F é a força externa aplicada a seção transversal da fibra de área A . Nesta condição, a Equação 2.2 pode ser simplificada,

$$\begin{pmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \end{pmatrix} = \frac{F}{AE} \begin{pmatrix} -\nu \\ -\nu \\ 1 \end{pmatrix} \quad (\text{m/m}) \quad \text{Equação 2.3}$$

A tensão na fibra irá causar o efeito fotoelástico responsável por incrementar seu índice de refração proporcionalmente à deformação. Para uma fibra deformada axialmente a variação no índice de refração é dado por:

$$\begin{pmatrix} \Delta n_x \\ \Delta n_y \\ \Delta n_z \end{pmatrix} = \frac{-n^3 e_z}{2} \begin{pmatrix} (1-\nu)p_{12} - \nu p_{11} \\ (1-\nu)p_{12} - \nu p_{11} \\ p_{11} - 2\nu p_{12} \end{pmatrix} \quad (\text{adimensional}) \quad \text{Equação 2.4}$$

Onde n é o índice de refração original; p_{11} e p_{12} são os coeficientes fotoelásticos no material. Para fibras óticas monomodo podemos aproximar a variação efetiva do índice de refração por Δn_x , uma vez que a onda luz propagada é essencialmente um modo transversal. A variação no índice é dada por:

$$\Delta n_{eff} = -\frac{n^3 [(1-\nu)p_{12} - \nu p_{11}] e_z}{2} = \gamma n e_z \quad (\text{adimensional}) \quad \text{Equação 2.5}$$

Onde $\gamma = -n^2 [(1-\nu)p_{12} - \nu p_{11}]/2$ é denominado de coeficiente fotoelástico efetivo. Nimihiro (1985) e Bertholds *et. al* (1988) mediram os coeficientes fotoelásticos para a sílica para um comprimento de onda de 632,8 nm e obtiveram $p_{11} = 0,113$ e $p_{12} = 0,252$ [21, 22]; para fibras óticas de sílica próxima a banda de infravermelho foi estimado $\gamma = -0,22$.

Outro efeito bastante explorado para o desenvolvimento de uma vasta gama de dispositivos é o deslocamento de fase da onda de luz propagada provocado pela deformação do filamento. Conhecido o comprimento da fibra, L , é possível escrever a variação de fase induzida por deformação como:

$$\Delta\phi = (1 + \gamma)nkLe_z \quad (\text{adimensional}) \quad \text{Equação 2.6}$$

A mudança de fase induzida por deformação pode ser medida por interferômetros de fibra, como um interferômetro de Mach-Zehnder (MZI) ou um interferômetro de Michelson (MI). Em grades de fibra, a deformação causa uma mudança em seus espectros de reflexão [23].

2.3.2 Perda de intensidade por flexão

Perdas na propagação de um sinal em uma fibra é um dos principais parâmetros de performance em um dispositivo fotônico. A flexão da guia de onda faz com que o pico do modo se mova do centro para a extremidade do da seção circular, e parte da energia do modo propagado pode ser irradiado para fora, como está ilustrado na figura 2.2.

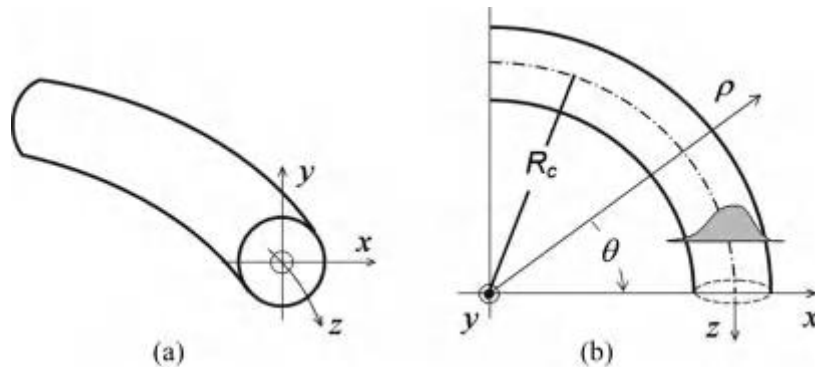


Figura 2.2: Fibra óptica em flexão: (a) Coordenadas cartesianas; (b) Coordenadas cilíndricas [17].

Se for considerado que o raio de curvatura de flexão, R_c , é muito maior que o raio da seção transversal da fibra, é possível aproximar uma fibra em flexão por uma retilínea de índice de refração equivalente. Através da separação de variáveis em coordenada cilíndricas, como indicada na figura 2.2-b, é possível escrever uma função azimutal equivalente da onda na direção Z [ref]. Esta equação, por sua vez, pode ser substituída em uma das equações de Maxwell $\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = k^2 n^2 \mathbf{E}$, da onde são derivadas três equações para as componentes do campo e a equação do índice de refração equivalente [24], sendo esta última dada por:

$$n_{eq}^2 k^2 = n^2 k^2 + \frac{1 - 4\beta^2 R_c^2}{4(R_c + x)^2} \quad (\text{adimensional}) \quad \text{Equação 2.6}$$

É possível mostrar que existe uma posição crítica $x = x_c$ cujo índice de refração equivalente da fibra flexionada é maior que o original; esta condição onda optica progagada nesta região se torne uma onda radiante, o que caracteriza o fenômeno perda de intensidade por flexão. Mais ainda, é verificado experimentalmente por [25] que a magnitude da perda é proporcional ao termo exponencial de $R_c^{-\frac{1}{2}} e^{CR_c}$, onde C é uma constante; isto é, a intensidade perdida está intimamente ligada ao raio de curvatura da fibra, sendo possível obter um raio crítico.

Como discutido no texto, a energia perdida causada pela flexão é convertida em modo de radiação e erradicada para fora da fibra e, no geral, deve ser evitada nos projetos de dispositivos ópticos. No entanto, a perda de flexão é um mecanismo de modulação de sinal bastante versátil e é utilizada como princípio de funcionamento em uma variedade sensores de fibra.

2.4 Sensor de fibra óptica de deformação

A medição da deformação de flexão desempenha um papel importante nos campos da engenharia mecânica e monitoramento de integridade de estruturas, como medição de ângulo de flexão mecânica, detecção de postura humana, construção de pontes e estradas e deformação estrutural [26-29]. Sensores de fibra óptica de deformação mecânica tem vantagens no tamanho reduzido, resistência interferência eletromagnética, resistente à corrosão, alta sensibilidade e baixo custo de manutenção [30-35], por isso é amplamente utilizado na medição de flexão em contrapartida a outros sensores elétricos. No geral, de acordo com o princípio da modulação, um sensor de fibra óptica de deformação mecânica pode ser dividido em três grandes categorias: modulação de intensidade [36], modulação de comprimento de onda [37], modulação de frequência [38].

Uma classe de sensores que se destaca pela sua robustez e ampla aplicação na indústria são que utilizam métodos baseados em FBG. Tal sensor é obtido através da flexão externa que modula o comprimento de onda central de Bragg. De acordo com a teoria das grades, a reflexão ocorrerá após um feixe de luz ser injetado na rede de Bragg de fibra quando a condição de fase é satisfeita, e os picos do espectro de reflexão são gerados em o comprimento de onda de Bragg. Em seguida, a grade é submetida a pressão externa, e o passo da grade é alterado, alterando assim o comprimento de onda da luz refletida. Existe

uma relação funcional entre a mudança de comprimento de onda da FBG e a deformação da fibra óptica [39]. Portanto, a mudança da curvatura pode ser determinada pela mudança do comprimento de onda.

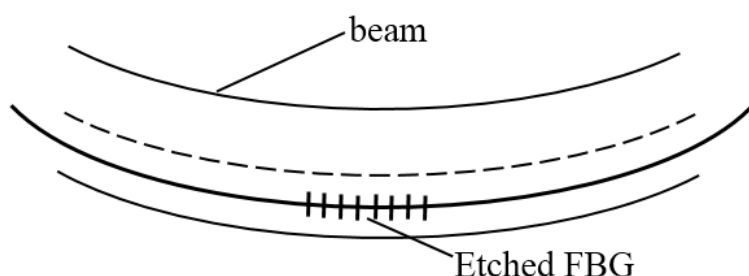


Figura 2.1. Diagrama esquemático de um sensor de deformação com um Etched FBG [40].

Apesar da sua comprovada robustez e alta sensibilidade, fatores associados a custo e escalabilidade dificultam sua ampla utilização em diversas áreas da engenharia, como de robótica flexível. Neste contexto, uma técnica de sensoriamento mais simplificada se faz necessária. Uma solução promissora baseia-se na modulação da transmissão de luz de uma fibra óptica, em que o mensurando causa as mudanças de intensidade da luz propagada ao longo da fibra devido à sua curvatura. Esta flexão, que causa a atenuação da luz, pode ser de duas formas: microcurvatura e macrocurvatura.

Sensores de microcurvatura são utilizados em aplicações onde as medidas como deformação, pressão, força, posição e aceleração podem ser acopladas mecanicamente ao movimento de um dispositivo que deforma a fibra. Para desencadear uma perda por microcurvatura nas aplicações de detecção, a fibra é colocada entre deformadores semelhantes a dentes [41]. À medida que a medida pré-selecionada é detectada pela sonda do sensor, a distância entre os dentes superiores e inferiores é reduzida e, eventualmente, causa uma série de formação de dobras ao longo da fibra. O movimento contínuo do deformador é linearmente dependente da intensidade da luz monitorada no detector na extremidade da fibra. Outra técnica interessante semelhante à microcurvatura é a técnica de macrocurvatura. Em comparação com a microcurvatura, a macrocurvatura não requer nenhum deformador para causar alterações na intensidade da luz à medida que o processo de detecção ocorre. Neste caso, a própria fibra é formada em forma de U, laço(s) redondo(s), forma senoidal ou outras formações de curvatura relacionadas para permitir alguma atenuação na intensidade da luz. A fibra é então colocada em elementos elásticos antes de ser usada como sensor. À medida que o elemento elástico é esticado, o raio de curvatura da fibra muda, assim, leva à alteração da intensidade da luz.

O presente trabalho busca o desenvolvimento de um sensor capaz de transformar estímulos mecânicos de tensão-deformação em um manipulador flexível em estímulos ópticos para seu efetivo monitoramento e controle. Desta forma, por representar uma técnica pouco complexa, de baixo custo e fácil aplicação, a modulação da intensidade luminosa por macrocurvatura da fibra óptica será utilizada como método base de sensoriamento mecânico neste trabalho.

Capítulo 3

Materiais e métodos

O aparato experimental, apresentado na figura 3.1, mostra os principais elementos do sistema de sensoriamento que serão empregados nos experimentos. Essencialmente o sensor óptico é constituído por uma unidade de aquisição e processamento embarcada no microcontrolador Atmega 2560, um emissor de luz e um receptor. A luz é emitida pelo transmissor em uma fibra óptica multimodo, é propagada até a sua extremidade onde é refletida por um espelho, que finalmente tem sua intensidade modulada pela curvatura da viga e demais estímulos mecânicos. A intensidade luminosa modulada é aquisitada pelo receptor e armazenada para análise.

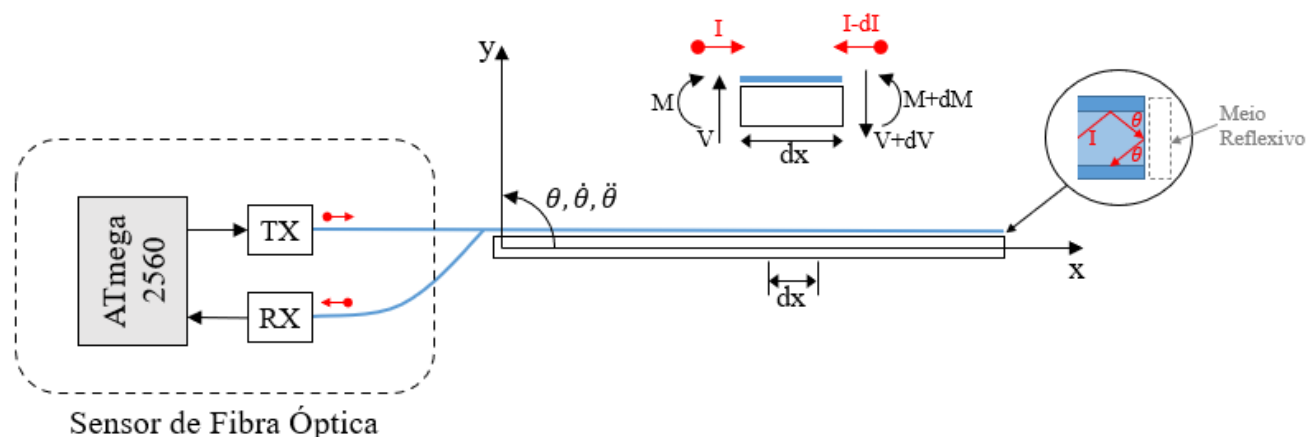


Figura 3.1. Aparato Experimental.

3.1. Sensor de fibra óptica

O elemento principal do sistema de sensoriamento consiste no sensor de fibra óptica: o transmissor HFBR1414 responsável por gerar o sinal luminoso de 820nm de comprimento de onda; o receptor HFBR2412 responsável por captar o sinal luminoso modulado e

transforma-lo em uma saída de tensão. A Série de componentes HFBR-0400 foi projetada para fornecer comunicação de fibra óptica econômica e de alto desempenho para sistemas de informação aplicações industriais com distâncias de link de até 2,7 quilômetros [42]. Assim, o circuito apresentado na Figura 3.2. deve fornecer um sinal preciso e de grande resolução.

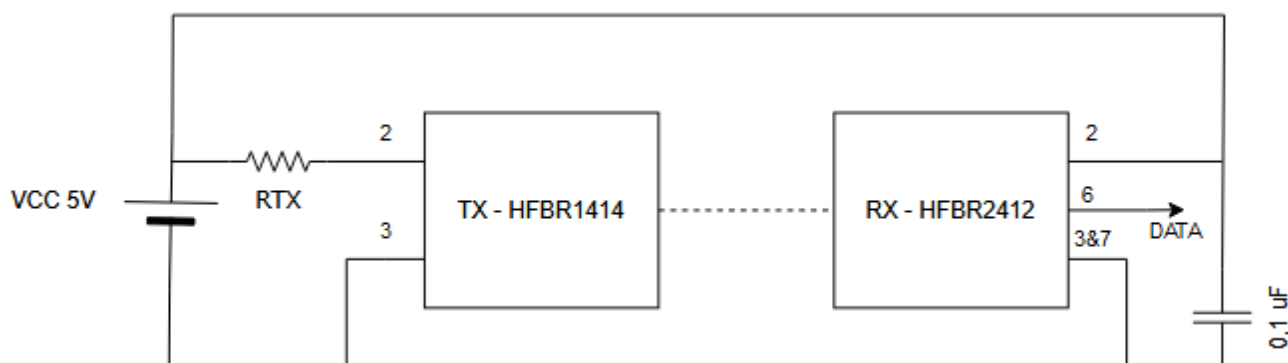


Figura 3.2. Circuito de aquisição de dados.

A aquisição dos sinais será realizada por um microcontrolador Arduino Mega 2560. A placa é baseada no microcontrolador de alta performance ATmega2560, cuja arquitetura é 8bits. Possui 54 pinos de entrada/saída digital (dos quais 15 podem ser usados como saídas PWM), 16 entradas analógicas, 4 UARTs (portas seriais de hardware), um oscilador de cristal de 16 MHz, uma conexão USB, um conector de alimentação, um conector ICSP, e um botão de reset [43].

3.2. Modelo computacional

A fim de validar os sinais medidos bem como ter uma referência teórica do comportamento dinâmico do sistema, será desenvolvido no ambiente do Matlab/Simulink um modelo computacional de um manipulador flexível com as mesmas características do elemento flexível que seja usado nos experimentos. Desta forma, será possível confrontar os dados experimentais com modelo e realizar o refinamento tanto das técnicas de processamento e análise de dados, quanto das propriedades do modelo computacional.

3.2.1. Modelo baseado na Equação da Viga de Euler

Uma modelagem baseada na Equação 2.8 para uma viga engastada é capaz de descrever todo o comportamento estático de uma viga no que diz respeito às suas tensões e deformações ao longo de todo seu comprimento. Considerando uma viga engastada e

uma carga F aplicada a sua extremidade livre, podemos obter as equações das suas curvas de deformação e esforços internos:

- (i) A equação diferencial de equilíbrio que governa uma viga estática é:

$$EI_{ZZ} \frac{d^4}{dx^4} v(x) = q(x)$$

- (ii) As condições de contorno necessárias para resolver essa equação são:

$$\begin{aligned} v(x=0) &= 0 \\ \theta(x=0) &= 0 \\ V_Y(y=L) &= +F \\ M_Z(y=L) &= 0 \end{aligned}$$

- (iii) A equação do carregamento é:

$$q(x) = 0$$

- (iv) Solução da equação diferencial:

$$\begin{aligned} EI_{ZZ} \frac{d^4}{dx^4} v(x) &= 0 \\ EI_{ZZ} \frac{d^3}{dx^3} v(x) &= c_1 \\ EI_{ZZ} \frac{d^2}{dx^2} v(x) &= c_1 x + c_2 \\ EI_{ZZ} \frac{d}{dx} v(x) &= \frac{1}{2} c_1 x^2 + c_2 x + c_3 \\ EI_{ZZ} v(x) &= \frac{1}{6} c_1 x^3 + \frac{1}{2} c_2 x^2 + c_3 x + c_4 \end{aligned}$$

Usando as condições de contorno (ii), teremos que:

$$\begin{aligned} c_4 &= 0 \\ c_3 &= 0 \\ c_1 &= +F \\ c_2 &= -FL \end{aligned}$$

- (v) Equações finais:

$$\begin{aligned} V_Y(x) &= F \\ M_Z(x) &= Fx - FL \\ \theta(x) &= \frac{1}{EI_{ZZ}} \left(\frac{1}{2} Fx^2 - FLx \right) \\ v(x) &= \frac{1}{EI_{ZZ}} \left(\frac{1}{6} Fx^3 - \frac{1}{2} FLx^2 \right) \end{aligned}$$

Capítulo 4

Resultados e Discussões

2.1. Simulações modelo estático

A fim de compreender o comportamento de um manipulador flexível de 1 link, no que diz respeito a seus esforços internos e deflexões, foram realizadas simulações com o modelo desenvolvido em 3.2.1. A tabela 2 apresenta das propriedades dos materiais que forma utilizados nas simulações. Alumínio puro e sua variação 6061 foi escolhido como um material referência, pois se trata de um metal bastante maleável e abundante na natureza e é utilizado na fabricação de uma grande variedade elementos mecânicos. PVC, ABS e Acetato são polímeros de baixa densidade pouco rígidos e, portanto, materiais promissores para serem usados como base de manipuladores flexíveis.

Tabela 2: Propriedades de materiais teste

Material	ρ (kg/m^3)	E (GPa)	σ_{esc} (MPa)
Alumínio puro	2710	70	50
Alumínio 6061	2725	71	270
PVC	1400-1700	2,4-4,1	48-58
ABS	1045	1,4-3,1	17-58
Acetato	1220-1340	1,0-2,0	25-65

Alguns valores foram arbitrados para realizar a simulação numérica do modelo baseado na Equação da Viga de Euler. Tais grandezas foram escolhidas de forma a satisfazer as condições de utilização da equação, isto é, o comprimento da viga deve ser muito maior que sua seção; e a largura da seção deve ser suficientemente maior que sua altura, para garantir que só exista movimento em torno de um único eixo. Em relação às dimensões da viga foi utilizado: comprimento $L=0,2$ m; largura da seção $b=0.02$ m; altura da seção $h=0,002$ m. Além disso, foi aplicada uma força $F=2$ N na extremidade livre da Viga.

Os resultados das simulações realizado para os materiais da Tabela 2 são apresentados na Figura 3.4. Nota-se que tanto o esforço cortante $V_y(x)$ quanto o momento fletor $M_z(x)$ não se modificam de acordo com os materiais pois só dependem de propriedades geométricas da viga. Apesar disso, o limite de escoamento de cada material é

distinto e deve ser superior (dimensionado de acordo com algum critério de falha) a tensão máxima na viga. As curvas $teta(x)$ e $v(x)$ indicam, respectivamente, o ângulo de rotação e a deflexão em relação ao eixo neutro da viga. Verifica-se que as magnitudes dessas medidas são diretamente proporcionais ao módulo de elasticidade do material, de modo que para o mesmo carregamento a deformação é diferente.

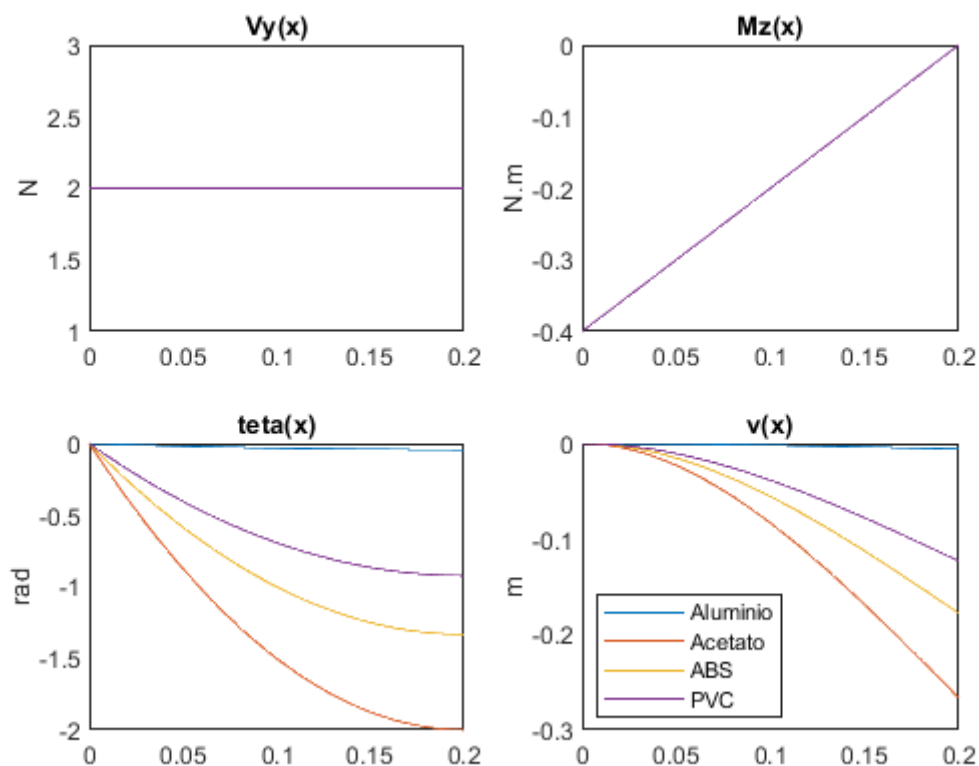


Figura 3.4. Simulações de vigas flexíveis engastadas: $V_y(x)$ esforço cortante; $M_z(x)$ momento fletor; $teta(x)$ rotação; $v(x)$ flecha.

Como visto na seção 2.3, os principais mecanismos de modulação mecânica da luz propagada em uma fibra óptica são deformação axial e flexão. No modelo apresentado, a deformação axial é função exclusivamente do momento fletor, $M_z(x)$, e como constado anteriormente esta grandeza independe do material. Por outro lado, a atenuação do sinal através de flexão gerará uma componente de perda característica para cada material. Manipuladores fabricados de materiais mais flexíveis gerarão deformações de amplitudes maiores que por sua vez amplificarão a sensibilidade do sensor baseado neste mecanismo de modulação, isto é, desde que o limite de escoamento do material não seja ultrapassado. De modo geral, o manipulador deve possuir o menor módulo de elasticidade possível a fim

de gerar deformações macroscópicas na fibra óptica e modular a intensidade do raio de luz propagado, mas também garantir que ele não falhará mecanicamente.

Capítulo 5

Cronograma

As atividades foram divididas ao longo de toda a duração das disciplinas de TG-I e TG-II, isto é, de março à novembro, como consta na Tabela 3. As atividades que serão desenvolvidas são:

- I. Revisão da literatura;
- II. Modelagem mecânica e simulação;
- III. Desenvolvimento de sistema de aquisição;
- IV. Análise de configurações e refinamento sensor;
- V. Desenvolvimento de protótipo de manipulador flexível;
- VI. Desenvolvimento de modelos de aprendizado de máquina;
- VII. Análise de resposta estática e dinâmica;
- VIII. Documentação e divulgação.

Tabela 3: Cronograma de atividades

Atividade	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV
I									
II									
III									
IV									
V									
VI									
VII									
VIII									

Capítulo 6

Conclusões

Este documento traz as etapas iniciais de desenvolvimento do trabalho de graduação necessário para conclusão do curso de Engenharia de Controle e Automação. Foram descritas as motivações, revisão da literatura e propostas iniciais de metodologias que serão usadas no projeto. As etapas do trabalho referente a revisão bibliográfica, desenvolvimento do modelo computacional do sistema e simulações foram concluídas, gerando resultados preliminares que guiarão as etapas experimentais. As próximas etapas se concentrarão na construção do aparato experimental, desenvolvimento do modelo de aprendizado de máquina e documentação do projeto.

Referências Bibliográficas

- [1] Kim, Sangbae, Cecilia Laschi, and Barry Trimmer. "Soft robotics: a bioinspired evolution in robotics." *Trends in biotechnology* 31.5 (2013): 287-294.
- [2] H. Supriyono, M.O. Tokhi, Parametric modelling approach using bacterial foraging algorithms for modelling of flexible manipulator systems, *Eng. Appl. Artif. Intell.* 25 (5) (2012) 898–916.
- [3] S.K. Dwivedy, P. Eberhard, Dynamic analysis of flexible manipulators, a literature review, *Mech. Mach. Theory* 41 (7) (2006) 749–777.
- [4] Naranjo, Alicia, et al. "Autonomous self-healing hydrogel with anti-drying properties and applications in soft robotics." *Applied Materials Today* 21 (2020): 100806.
- [5] Pena-Francesch, Abdon, et al. "Biosynthetic self-healing materials for soft machines." *Nature Materials* 19.11 (2020): 1230-1235.
- [6] Qiu, Zhi-cheng, Cheng Li, and Xian-min Zhang. "Experimental study on active vibration control for a kind of two-link flexible manipulator." *Mechanical Systems and Signal Processing* 118 (2019): 623-644.
- [7] Hill, K. O., Fujii, Y., Johnson, D. C., and Kawasaki, B. S., 1978, "Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection filter fabrication," *Applied Physics Letters* 32(10), 647–649.
- [8] Mueller, Uwe C., et al. "Vibration and shape control in opto-mechanical systems using distributed fiber-optic bragg grating sensors." *Journal of Vibration and Control* 16.4 (2010): 539-553.
- [9] Gu, Min, and Jean-Claude Piedbœuf. "A flexible-arm as manipulator position and force detection unit." *Control engineering practice* 11.12 (2003): 1433-1448.
- [10] De Carufel, J., E. Martin, and J-C. Piedbœuf. "Control strategies for hardware-in-the-loop simulation of flexible space robots." *IEE Proceedings-Control Theory and Applications* 147.6 (2000): 569-579.
- [11] Tao, Weimin, et al. "Residual vibration analysis and suppression for SCARA robot arm in semiconductor manufacturing." *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, 2006.
- [12] Diana, M., and JJBJoS Marescaux. "Robotic surgery." *Journal of British Surgery* 102.2 (2015): e15-e28.
- [13] Feliu, Vicente, et al. "Repetitive control for single link flexible manipulators." *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 2005.
- [14] Bascetta, Luca, and Paolo Rocco. "End-point vibration sensing of planar flexible manipulators through visual servoing." *Mechatronics* 16.3-4 (2006): 221-232.
- [15] Dubus, Gregory, Olivier David, and Yvan Measson. "A vision-based method for estimating vibrations of a flexible arm using on-line sinusoidal regression." *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 2010.
- [16] Dubus, Gregory. "On-line estimation of time varying capture delay for vision-based vibration control of flexible manipulators deployed in hostile environments." *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE, 2010.
- [17] Fang, Zujie, et al. *Fundamentals of optical fiber sensors*. Vol. 226. John Wiley & Sons, 2012.

- [18] Akamatsu, Takeshi, Koji Okamura, and Yoichi Ueda. "Fabrication of long fibers by an improved chemical vapor deposition method (HCVD method)." *Applied Physics Letters* 31.3 (1977): 174-176.
- [19] Suzuki, CARLOS K., and D. Torikai. "Vitreous silica processing by vapor phase deposition for optical fiber preform." *Radiation effects and defects in solids* 147.1-2 (1998): 55-63.
- [20] Clark, Sydney Procter, ed. *Handbook of physical constants*. Vol. 97. Geological society of America, 1966.
- [21] Namihira, Yoshinori. "Opto-elastic constant in single mode optical fibers." *Journal of lightwave technology* 3.5 (1985): 1078-1083.
- [22] Bertholds, Axel, and Rene Dandliker. "Determination of the individual strain-optic coefficients in single-mode optical fibres." *Journal of lightwave technology* 6.1 (1988): 17-20.
- [23] Dandridge, Anthony. "Fiber optic sensors based on the Mach-Zehnder and Michelson interferometers." *Fiber Optic Sensors: an Introduction for engineers and scientists* (1991): 271-323.
- [24] Vassallo, Charles. "Optical waveguide concepts." *Optical Wave Sciences and Technology* 1 (1991): Sec-5.
- [25] Petermann, K. "Microbending loss in monomode fibres." *Electronics Letters* 4.12 (1976): 107-109.
- [26] Majidi C, Kramer R, Wood R J. A non-differential elastomer curvature sensor for softer-than-skin electronics. *Smart Materials & Structures*, 2011, 20(10):105017.
- [27] Asbeck A T, Rossi S M M D, Galiana I, et al. Stronger, Smarter, Softer: Next-Generation Wearable Robots. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2014, 21(4):22-33.
- [28] Zheng S, Shan B, Ghandehari M, et al. Sensitivity characterization of cladding modes in long-period gratings photonic crystal fiber for structural health monitoring. *Measurement*, 2015, 72:43-51.
- [29] Leung C K Y, Wan K T, Inaudi D, et al. Review: optical fiber sensors for civil engineering applications. *Materials & Structures*, 2015, 48(4):871-906.
- [30] Wang Q, Zhao W M. A comprehensive review of lossy mode resonance-based fiber optic sensors. *Optics & Lasers in Engineering*, 2018, 100:47-60.
- [31] Liao C R, Wang D N, Fang X. Femtosecond laser fabricated fiber Bragg grating in microfiber for refractive index sensing. *Optics Letters*, 2010, 35(7):1007.
- [32] Chen J, Lu P, Liu D, et al. Optical fiber curvature sensor based on few mode fiber. *Optik – International Journal for Light and Electron Optics*, 2014, 125(17):4776-4778.
- [33] Yariv A, Winsor H V. Proposal for detection of magnetic fields through magnetostrictive perturbation of optical fibers. *Optics Letters*, 1980, 5(3):87.
- [34] Qian Y, Zhao Y, Wu Q L, et al. Review of salinity measurement technology based on optical fiber sensor. *Sensors & Actuators B Chemical*, 2018, 260:86–105.
- [35] Qi Wang, Wanming Zhao. Optical Methods of Antibiotic Residues Detections: A Comprehensive Review, *Sensors & Actuators B: Chemical*, 2018, 269: 238-256.
- [36] Grattan K T V, Meggitt B T. *Optical Fiber Sensor Technology*. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2000, 30(4):472-511.
- [37] De Sterke C M, Broderick N G. Coupled-mode equations for periodic superstructure Bragg gratings. *Optics Letters*, 1995, 20(20):2039.

- [38] Yong Zhao, Mao-qing Chen, Ri-qing Lv, Feng Xia, Song An-ning, Small In-fiber Fabry-Perot low-frequency acoustic pressure sensor with PDMS diaphragm embedded in hollow-core fiber, *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, 270:162-169.
- [39] F. M. Araújo, L. A. Ferreira, J. L. Santos. Simultaneous determination of curvature, plane of curvature, and temperature by use of a miniaturized sensing head based on fiber Bragg gratings. *Applied Optics*, 2002, 41(13):2401-7.
- [40] Yu Y, Zhao Z, Zhuo Z, et al. Bend sensor using an embedded etched fiber Bragg grating. *Microwave & Optical Technology Letters*, 2004, 43(5):414-417
- [41] Rodrigues, Matheus S., et al. "Characterization of hand gestures by a smartphone-based optical fiber force myography sensor." *Engineering Proceedings* 2.1 (2020): 46.
- [42] Avago Technologies, 2007. *HFBR-0400 Series*. Disponível em: <pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/64659/HP/HFBR-0400.html>. Acesso em: 09, abril de 2022.
- [43] Arduino Docs, 2022. *Mega 2560 Rev3*. Disponível em: <https://docs.arduino.cc/hardware/mega-2560>. Acesso em: 09, abril de 2022.