

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE FÍSICA - ESCOLA DE ENGENHARIA**

BRUNO N S VIVAN

**SISTEMA DE AUTO ALINHAMENTO PARA
ACOPLAMENTO DE SINAL EM FIBRAS ÓPTICAS**

Porto Alegre
Fevereiro de 2017

BRUNO NAEJ SIGAL VIVAN

**SISTEMA DE AUTO ALINHAMENTO PARA
ACOPLAMENTO DE SINAL EM FIBRAS ÓPTICAS**

Trabalho de diplomação apresentado ao Instituto de Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para obtenção do título de bacharel em Engenharia Física.

Orientador: Ricardo Rego Bordalo Correia

Porto Alegre

Fevereiro de 2017

*Agradeço a minha família por não ter desistido mesmo sabendo
que qualquer sucesso era extremamente improvável dadas
as condições iniciais do meu nascimento.*

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SIGLAS

RESUMO

ABSTRACT

1. INTRODUÇÃO

2. OBJETIVO

3. METODOLOGIA

3.1 Estado da Arte

3.2 Fibras Ópticas e Acoplamento

3.3 Materiais Piezoelétricos

3.4 Controlador Proporcional-Integral-Derivativo

3.5 Sistema e Montagem

3.6 Experimentos

7. RESULTADOS

8. CONCLUSÃO

9. REFERÊNCIAS

LISTA DE LINKS

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura de uma fibra óptica

Figura 2 - Reflexão interna total

Figura 3 - O cone de aceitação de uma fibra óptica multimodo

Figura 4 - Modos guiados guias de onda simétricos

Figura 5 - Fibra de cristal fotônico

Figura 6 - Piezoeletricidade em cerâmicas

Figura 7 - Estrutura do material piezoelétrico

Figura 8 - Diagrama cíclico de um controlador PID

Figura 9 - Calibração de um sistema PID

Figura 10 - Diagrama de blocos do sistema

Figura 11 - Sinal sobre os piezoelétricos

Figura 12 - Diâmetro do círculo de varredura

Figura 13 - Detecção de desalinhamento do ponto ótimo

Figura 14 - Interface de controle

Figura 15 - Configuração básica do sistema

Figura 16 – Esquemática do primeiro experimento

Figura 17 - Esquemática do segundo experimento

Figura 19 – Curvas de calibração do controlador - Primeiro Experimento

Figura 18 - Esquemática do terceiro experimento

Figura 20 - Curvas de calibração do controlador - Segundo Experimento

Figura 21 - Curvas de calibração do controlador - Terceiro Experimento

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Deformação de materiais piezoelétricos por tensão aplicada

Tabela 2 - Tempo de resposta e diâmetro do círculo de varredura

LISTA DE SIGLAS

AC - Corrente alternada. Sinal AC indica um sinal com uma componente que se alterna no tempo.

ADN - Ácido desoxirribonucleico

APT - Automatic Position Tracking

PID - Controlador do tipo proporcional-integral-diferencial

PZT - Titanato zirconato de chumbo

PVDF - Fluoreto de polivinilideno

RESUMO

O alinhamento de sistemas ópticos é um obstáculo grande na montagem de experimentos em laboratórios, principalmente quando se trata de acoplamento de sinal em fibras ópticas. O objetivo deste trabalho é realizar a montagem e a caracterização de um sistema de auto alinhamento que utiliza controladores do tipo proporcional-integral-derivativo e atuadores piezoelétricos para otimizar e manter acoplamento óptico, especialmente em fibras com pequeno diâmetro nominal do núcleo. A caracterização foi feita através de testes de desempenho com crescente nível de dificuldade e os resultados demonstrados através das curvas de calibração dos controladores. Os experimentos mostraram que o sistema acopla e mantém o acoplamento de fibras ópticas multimodais e monomodais, com controle preciso da posição em dimensão de dezenas de nanômetros. Com os resultados obtidos é feita uma análise das capacidades do equipamento quanto seu uso em uma montagem para geração de supercontínuo e futuras aplicações.

Palavras-Chave: Fibra Óptica; PID; Piezoelétricos; Alinhamento.

ABSTRACT

Alignment of optical systems is a major obstacle in the assembly in laboratory, especially when it comes to signal coupling in optical fibers. The goal of this work is to assemble and characterize an auto alignment system that uses proportional-integral-derivative controllers and piezoelectric actuators to optimize and maintain optical coupling, especially in fibers with small nominal diameter of the core. The characterization was done through performance tests with increasing level of difficulty and the results demonstrated through the calibration curves of PID controllers. The experiments have shown that the equipment is able to couple and maintain alignment in multimode and monomode optical fibers, accurately controlling positions with precision of 10 nanometers. With the obtained results an analysis is made of the equipment capacities, for its use in an assembly for generation of supercontinuum and future works.

Keywords: Optical Fiber, PID, Piezoelectric, Alignment

1 INTRODUÇÃO

Fibras ópticas são utilizadas ao redor do mundo para telecomunicações por oferecerem vantagens sobre cabos metálicos, permitindo uma alta taxa na transmissão de dados a longas distâncias [1]. Também são utilizadas em laboratório para transporte e transformação de luz, como também em pesquisas nas propriedades da própria fibra.

A viabilidade da utilização de uma fibra óptica como meio para propagação de luz depende, principalmente, que esta possua uma baixa perda. Outro fator relevante é a qualidade no acoplamento e desacoplamento da luz na fibra [2], ou seja, a eficiência com a qual o sinal óptico é inserido e removido da fibra. A baixa perda em uma fibra depende da qualidade da fibra em termos de números de defeitos presentes, oriundos da fabricação da fibra, assim como uma alta transparência à luz e até de cuidados que devem ser tomados no manuseio e na instalação de sistemas com fibras ópticas. Já a eficiência do acoplamento depende do alinhamento entre a fonte de luz e o núcleo da fibra.

É possível utilizar de um controlador PID para auxiliar o acoplamento e é essencial na implementação de um sistema onde fibras ópticas com diâmetro reduzido do núcleo são utilizadas. Uma variação pequena, submicrométrica, no posicionamento de um laser pode inviabilizar por completo o acoplamento e encerrar a transmissão de sinal através de uma fibra óptica de núcleo pequeno. Esse tipo de problema é recorrente em fibras ópticas monomodo ou fibras de produção de pulsos contínuos, que possuem diâmetro do núcleo por volta de 8 micrômetros [5]. A presença de um método eficiente no controle do acoplamento é o que possibilita o acoplamento de um sinal óptico nessas fibras.

Um controlador PID (proporcional-integral-derivativo) é um dispositivo que permite o controle no tempo de uma variável de um processo, como uma corrente elétrica, ou uma tensão sobre um resistor, ou uma posição no espaço, de forma que essa variável é ajustada continuamente para que assuma um valor desejado, esse processo pode ser utilizado para o controle do alinhamento de fibras ópticas [3]. Esse dispositivo, utilizando cerâmicas piezoelétricas, pode responder com precisão nanométrica [4] a deslocamentos em sua posição ideal oriundos de vibrações ou estresse térmico, por exemplo, mantendo assim o alinhamento da fibra e a máxima eficiência do acoplamento de luz.

Esta monografia foi elaborada como trabalho de diplomação para o curso de Engenharia Física na Universidade Federal do Rio Grande do Sul e discorre sobre fibras ópticas, piezoeletricidade e utilização de controladores PID para manutenção de acoplamentos em escala submicrométrica. O intuito é, ao tratar de todos esses pontos, formar a base teórica que permitirá a implementação desse sistema em futuros experimentos e aplicações, como a construção de uma linha de supercontínuo e montagens com exigência de precisão submicrométrica.

2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é realizar a montagem e caracterização do equipamento APT - NanoTrak da companhia THORLABS, um sistema de auto posicionamento para acoplamento de sinais ópticos. O diferencial do sistema proposto é possuir o posicionamento controlado da fibra em escala nanométrica utilizando cerâmicas piezoelétricas e realimentação com sinal PID - de forma que o controle no espaço em duas dimensões mantenha a luz acoplada na fibra, mesmo em situações de interferência do meio, como vibrações. O sistema é particularmente interessante para acoplamento em fibras monomodo, em especial fibras ópticas para produção de pulsos de espectro contínuo, devido às pequenas dimensões do núcleo da fibra.

3 METODOLOGIA

3.1 Estado da Arte

Para acoplamento de sinais em fibras ópticas são utilizados os chamados sistemas de lançamento. Esses sistemas são caracterizados por realizar o controle do posicionamento de uma fonte de luz, como um laser, para que o sinal seja devidamente inserido no núcleo de uma fibra no ângulo necessário para reflexão interna total. Um conjunto de lentes é utilizado para que o diâmetro do feixe seja do tamanho ideal para o núcleo de poucos micrômetros de uma fibra óptica monomodo convencional.

O módulo APT (automatic position rastreamento) produzido pela companhia THORLABS representa o estado da arte do desenvolvimento da atual tecnologia de sistemas de lançamento, equipamentos que auxiliam acoplamento e desacoplamento de luz, para fibras ópticas. O equipamento utiliza cerâmicas piezoelétricas e controladores PID em conjunto para procurar a posição de melhor acoplamento e mantê-la por tempo indeterminado, protegendo o sistema óptico de vibrações que causam desalinhamento [8]. A solução possui uma interface de controle simples onde o equipamento pode ser configurado para auxiliar o procedimento de alinhamento.

3.2 Fibras Ópticas e Acoplamento

Uma fibra óptica é um material transparente e flexível, na forma cilíndrica usualmente, e, geralmente feitas de sílica ou plástico. É utilizada como meio de transporte de luz, sendo aplicadas em telecomunicações, por permitirem transmissão de uma alta taxa de dados (largura de banda) em longas distâncias, muito superior em desempenho a cabos metálicos convencionais. Além dessas vantagens, fibras ópticas também são

interessantes por não sofrerem interferência eletromagnética externa, problemas graves para a transmissão de sinais por cabos metálicos [5].

Tipicamente, fibras ópticas (Figura 1) são compostas de um núcleo transparente feito de material dielétrico envolto por um material transparente também dielétrico chamado de *casca* que possui índice de refração aproximadamente 1% menor [9] [4]. Isso permite que para certas condições, a luz transmitida através da fibra continue em seu interior se propagando na direção do eixo da fibra, e não escape transversalmente (refrate para a casca) devido ao fenômeno muito bem conhecido chamado de reflexão interna total - que resulta na fibra se comportando como um guia de onda [10].

Figura 1 - Estrutura de uma fibra óptica

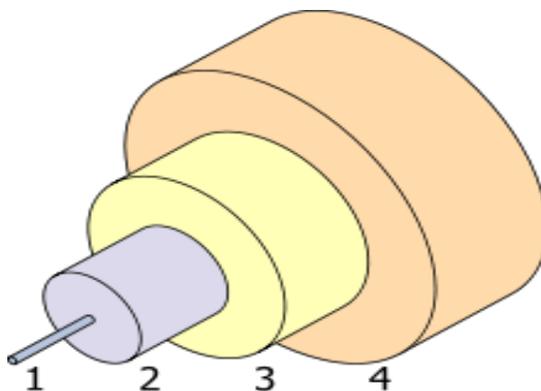


Fig1: Estrutura simplificada de uma fibra óptica. Para o tipo monomodo, temos o diâmetro do núcleo de dimensões ao redor de 10 microns (1). Ao redor do núcleo, a casca, com dimensões entre 100 e 200 microns de diâmetro dependendo da aplicação (2). Ao redor da casca um isolamento e um revestimento de proteção que somados possuem entre 600 até 1000 micrômetros (3 e 4).

Fonte: "Diagram of a single mode (SM) optical fiber", by Bob Mellish

Os valores desejados para os índices de refração na fibra óptica são alcançados com a inserção de dopantes durante o processo de fabricação. Geralmente é utilizado dióxido de germânio ou óxido de alumínio para aumentar o índice de refração e o trióxido de boro para diminuí-lo [9]. Tipicamente, o núcleo e a casca são dopados da mesma

maneira e formam um composto único - aluminossilicato, borossilicato ou germanossilicato, por exemplo [4] [9].

Para que ocorra reflexão interna total, a luz que se propaga dentro da fibra óptica precisa chegar na interface entre núcleo e casca em um ângulo maior que o correspondente ângulo crítico desta interface, descrito pela equação [9]:

$$\theta_c = \arcsin \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \text{ (Equação 1)}$$

Sendo:

θ_c : ângulo crítico em relação à normal da interface entre os dois meios

n_2 : índice de refração da casca

n_1 : índice de refração do núcleo

Observe a Figura 2. Se o feixe incidente está precisamente sobre o ângulo crítico o feixe refratado é tangente à interface entre núcleo e casca. Se o feixe possui um ângulo menor que o crítico ocorre refração para o meio da casca. Mas se o ângulo é maior que o ângulo crítico, o feixe de luz é completamente refletido de volta ao núcleo da fibra óptica e continua sua trajetória dentro da fibra [10].

Figura 2 - Reflexão Interna Total e ângulo crítico

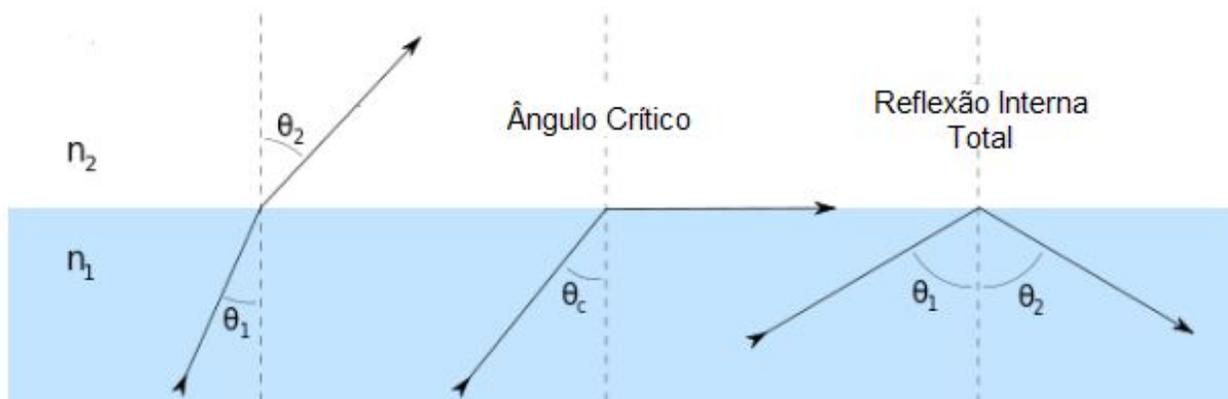


Fig2: Para compreendermos as condições necessárias para reflexão interna total podemos utilizar a interface entre água e ar. O fenômeno é o mesmo, apesar de ocorrer para um ângulo diferente, no interior de uma fibra óptica.

Fonte: Adaptação de: “Optical reflection: critical angle and total internal reflection”

[Josell7](#) - Wikimedia.

O ângulo crítico define um ângulo de aceitação para a fibra, que também é chamado de cone de aceitação ou abertura numérica (NA, *numerical aperture*), visível quando observamos a fibra como um elemento em três dimensões (simplificação em duas dimensões na Figura 3) [1]. A fibra óptica só propaga luz sem perdas, em reflexão interna total, que entra em seu núcleo através desse cone. Para uma fibra do tipo *degrau de índice*, o ângulo que descreve o cone de aceitação pode ser expresso através dos índices de refração envolvidos. A expressão tem a mesma forma que a da abertura numérica de uma objetiva de microscópio, por exemplo, de forma que é comum definir a abertura numérica de uma fibra como:

$$NA = n_{\text{meio}} \sin \theta_{\text{meio-cone}} = \sqrt{n_{\text{núcleo}}^2 - n_{\text{bainha}}^2} \quad (\text{Equação 2})$$

Sendo:

NA: A abertura numérica da fibra óptica.

n_{meio} : O índice de refração do meio no qual a fibra está inserida.

$n_{\text{núcleo}}$: O índice de refração do núcleo da fibra óptica.

n_{casca} : O índice de refração da casca.

$\theta_{\text{meio-cone}}$: A metade do ângulo que descreve um cone.

Uma grande abertura numérica está relacionada com a capacidade da fibra de propagar diferentes modos, ou em termos de óptica geométrica, feixes de luz que percorrem diferentes caminhos ópticos dentro da fibra (Figura 3), cada caminho com um ângulo específico de reflexão dentro da fibra, o que permite múltiplos acoplamentos simultâneos [9] [11].

Figura 3 - Cone de aceitação de uma fibra óptica multimodo

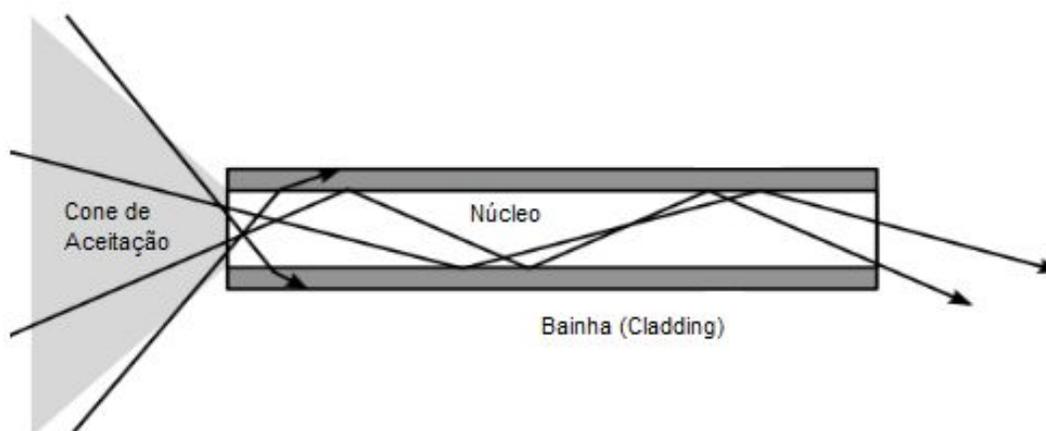


Fig3: Seção de uma fibra multimodo. O cone de aceitação é bastante grande, permitindo que feixes de luz entrando na fibra em diferentes ângulos sejam acoplados na fibra.

Fonte: Adaptação de: "The propagation of light through a multi-mode optical fiber."

Wikimedia Uploaded by gringer

De acordo com a teoria eletromagnética, é possível demonstrar que diferentes tipos de superfícies dielétricas (simetricamente dispostas) comportam modos guiados [20], que podem possuir ou não componentes magnéticas ou elétricas na direção de propagação da onda. Usualmente, esses percursos possuem a característica de um confinamento lateral estacionário, ao mesmo tempo em que ocorre propagação em pelo menos uma direção espacial. A figura 4 representa diferentes modos dentro de guias de onda simétricos.

Figura 4 - Modos guiados em guias de onda simétricos

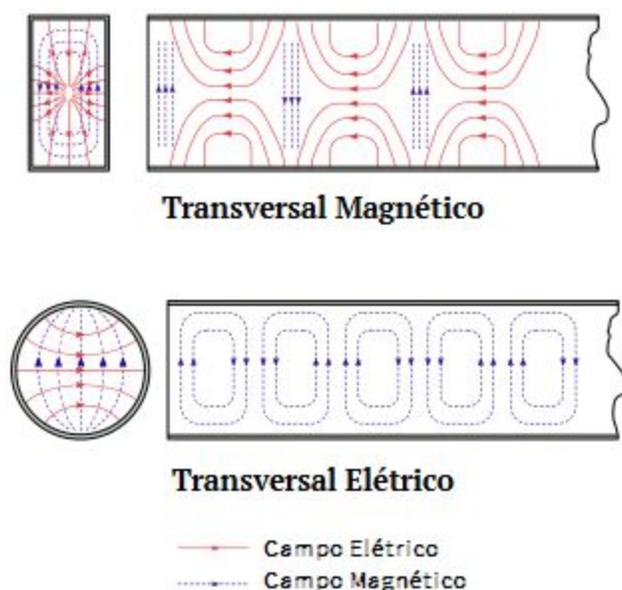


Fig4: Guias de onda retangular e circular e diferentes modos guiados.

Fonte: Adaptação de “Field patterns of some commonly used waveguide modes”

Uploaded by Spinningspark at Wikipedia

Os modos guiados são classificados em modos transversais quando eles são perpendiculares a direção espacial de propagação da onda. Podendo ser eletromagnéticos, magnéticos ou elétricos, dependendo de qual campo não possui componente na direção de propagação da onda, ou híbridos quando possuem. Além

disso, os modos possuem sub-índices para identificar o número de comprimentos de onda confinados em cada direção de um guia de onda - no caso de um guia de onda circular, os sub-índices são usados para indicar número de comprimentos de onda ao longo da circunferência e ao longo do diâmetro, por exemplo.

No caso de uma fibra óptica, um parâmetro chamado de **frequência normalizada** é extremamente útil no cálculo de modos guiados possíveis para certa fibra óptica. Este parâmetro é obtido ao resolvermos as equações de Maxwell com as condições de contorno para propagação de ondas dentro de um guia de ondas cilíndrico, como uma fibra óptica, e tem a seguinte forma:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} NA \quad (\text{Equação 3})$$

Sendo:

V : Frequência normalizada, também chamado de número V. Adimensional.

a : Raio do núcleo da fibra óptica.

λ : Comprimento de onda utilizado.

NA : Abertura numérica da fibra.

Fundamentalmente, o que define o número de modos guiados, ou seja, diferentes caminhos ópticos dentro da fibra para transporte de luz sem perdas são: a dimensão do núcleo, o comprimento de onda utilizado e os índices de refração da fibra [20]. Para um valor de V pequeno (abaixo de 2.405; este valor é a primeira raiz da função de Bessel, que é solução para as equações de Maxwell em um guia de onda cilíndrico.), existe apenas um modo guiado, que resulta em uma fibra monomodo. Para um valor de V grande, existem múltiplos modos dentro da fibra, o que classifica a fibra como sendo do tipo multimodo. Para uma fibra do tipo *degrau de índice* o número de modos guiados é proporcional a $0,405 V^2$.

Como um exercício, podemos calcular o tamanho aproximado do núcleo de uma fibra óptica monomodo através da formulação acima. Tomemos como parâmetro uma fibra óptica convencional utilizada em telecomunicações para aplicação com uma fonte no infravermelho, em torno de 1400 nm. Fibras comerciais de alta eficiência são produzidas com uma diferença pequena no índice de refração entre o núcleo e a casca. Para esse exercício vamos assumir que os índices de refração são respectivamente de 1.515 e 1.5 - uma diferença de 1%. Usando o valor V de corte para apenas um modo temos de acordo com a equação 3:

$$a = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{V}{NA} \approx 2.5 \mu m$$

Podemos ver que como o raio do núcleo da fibra está relacionado com o valor de V , ao escolhermos o valor que permite apenas um modo de propagação temos uma fibra com o diâmetro bastante reduzido, em torno de $5\mu m$.

Existem fibras para aplicações específicas que possuem diâmetro do núcleo menor do que o demonstrado acima, uma delas é a fibra óptica de cristal fotônico de efeitos não-lineares. O perfil desse tipo de fibra possui simetria axial com estrutura periódica de índices de refração (Figura 5). A luz se propaga de forma semelhante a uma fibra óptica monomodo, todavia, a estrutura ao redor do núcleo constitui um índice de refração efetivo diferente do de uma casca convencional.

Figura 5 - Fibra de Cristal Fotônico

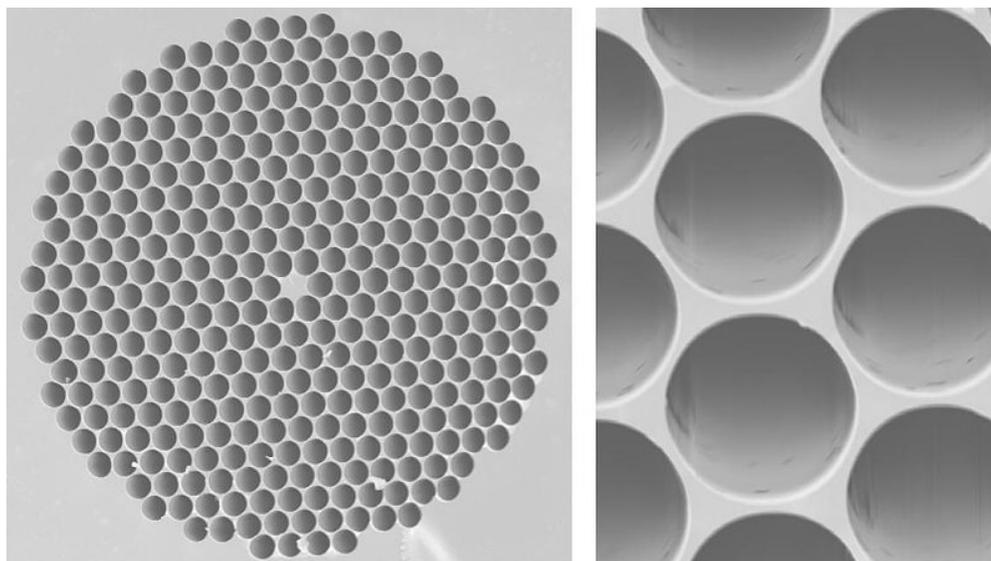


Fig5: Fibra de cristal fotônico. O núcleo possui diâmetro de aproximadamente 4 μm enquanto as passagens laterais possuem 3 μm .

Fonte: Adaptação de “Photonic-crystal-fiber”

Uploaded by Esprite Fugace at Wikipedia

O núcleo é fabricado com um material de alta não-linearidade óptica que possui propriedade de geração de frequências ópticas diferentes da inserida pela fonte de luz. O sinal de saída gerado ao longo da fibra por um pulso de entrada na região espectral do vermelho é constituído por um largo espectro que cobre o infravermelho ao violeta, chamado de contínuo. Esse tipo de fibra possui o núcleo de tamanho aproximado de uma monomodo, ou menor, e é o acoplamento de luz nessas dimensões que necessita de um sistema como o que este trabalho tem como objetivo de implementar - uma vez que um desalinhamento de fração de microns pode ser suficiente para inviabilizar o acoplamento óptico.

3.3 Materiais Piezoelétricos

Da definição, piezoeletricidade é a carga elétrica que se acumula em materiais sólidos como cristais, cerâmicos e alguns tipos de materiais biológicos, em resposta a uma

tensão mecânica aplicada [12]. O fenômeno é reversível, de forma que ao aplicarmos um campo elétrico em um material piezoelétrico ele sofre deformação mecânica em resposta.

A natureza do efeito piezoelétrico (Figura 6) se dá pela existência de momentos de dipolo elétrico estático em sólidos [13]. Esses momentos de dipolo são oriundos do posicionamento de íons na estrutura cristalina de forma a causar distribuição assimétrica de cargas ou em grupos moleculares que apresentam naturalmente um momento de dipolo. A densidade desses dipolos, também chamada de polarização, é a soma dos momentos de dipolos por volume da célula unitária. Como cada dipolo é um vetor, a polarização de um material é um campo vetorial.

Figura 6 - Piezoelectricidade em materiais cerâmicos

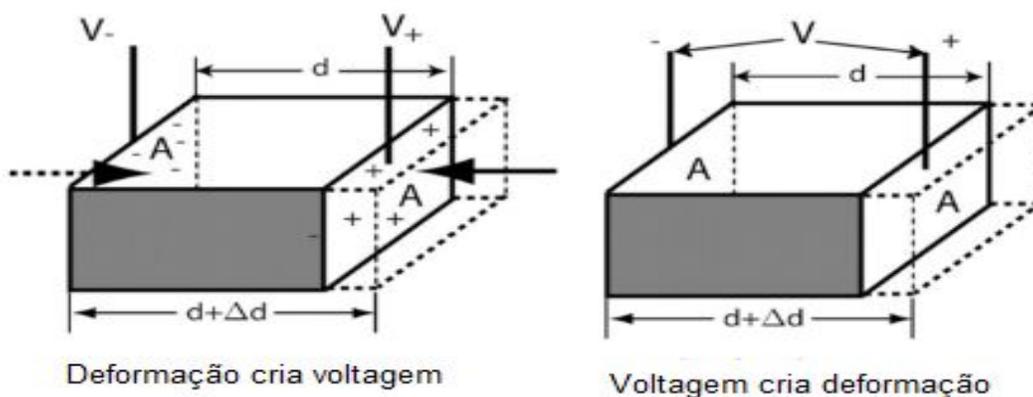


Fig6: O efeito piezoelétrico e seu efeito reverso. Materiais com essa propriedade são cristais com cargas distribuídas assimetricamente, de forma que tensões causam variação da polarização total do material, gerando campo. E campo elétrico aplicado no material polarize as cargas gerando tensões em seu interior.

Fonte: Adaptação de: "Direct and reverse Piezoelectric Effect" de *Journal of Ultrasound in Medicine*

Normalmente, dipolos próximos uns aos outros tendem a se alinhar criando regiões chamadas de domínios de Weiss. Todavia, esses domínios dentro de um material sólido estão orientados de forma aleatória [14]. Os domínios de um material podem ser alinhados através de aplicação de fortes campos elétricos em elevadas temperaturas - um pouco semelhante ao processo de magnetização de materiais ferromagnéticos. Todavia, nem todos os materiais podem ser expostos a essas condições para esse procedimento de alinhamento.

De fundamental importância na compreensão do fenômeno é a mudança na polarização do material quando este sofre estresse mecânico. Isso ocorre devido a uma reconfiguração dos dipolos ou reorientação dos momentos moleculares. Então, a piezoelectricidade resultante depende da orientação da polarização no cristal, do tipo de simetria do cristal e da intensidade do estresse aplicado [13].

Tabela 1 - Deformação de materiais piezoelétricos por tensão aplicada

Material	Aplicação	pm/V
Cerâmicas PZT	Atuadores e Transdutores	100-500
Cristais de LiNbO ₃	Dispositivos Eletro-Ópticos	10-20
Quarzo	Balanças e Padrões de Frequência	3
Semicondutores Polares	Dispositivos RF e Chaves	0.1-2
Tecidos Calcificados		0.5-3
Colágeno		0.5-3

Tab1: Alguns materiais que exibem piezoelectricidade e suas aplicações. A última coluna representa a proporção com que cada material responde a uma tensão aplicada com relação ao aumento de seu volume.

Fonte: Adaptação de "Piezoresponse Force Microscopy with Asylum Research AFMs" Roger Proksch, Asylum Research and Sergei Kalinin, Center for Nanophase Materials Sciences (CNMS) at Oak Ridge National Laboratory

Diversos materiais são conhecidos por exibir o comportamento piezoelétrico (Tabela 1). Alguns deles são: quartzo e berlinita, titanato zirconato de chumbo (PZT), ADN, ortofosfato de gálio, tantalato de lítio, titanato de bário, óxido de zinco, PVDF (fluoreto de polivinilideno) e alguns outros polímeros [15]. Além disso, cristais semicondutores, especialmente os dos grupos III-V, e II-VI, possuem potencial piezoelétrico [13]. Grande parte destes materiais se organiza na forma de blenda de zinco - que são estruturas cristalinas conhecidas por possuírem os coeficientes de piezoeletricidade. O fenômeno é mais intenso nos cristais como Nitreto de Gálio, Nitreto de Índio, PZT e Óxido de Zinco [14]. Essa lista extensa de materiais é bastante estudada e suas propriedades são bem conhecidas e aplicadas em fontes de alta voltagem, sensores, atuadores, padrões de frequência, redutores de vibrações e ruídos, motores piezoelétricos e muitas outras - sendo importante para este trabalho a aplicação em atuadores [12].

Como atuadores, materiais piezoelétricos podem responder em precisão subnanométrica a aplicações de campos elétricos, sendo uma excelente ferramenta para posicionamento em pequenas escalas [13]. Isso só é possível porque grandes campos elétricos correspondem a pequenas mudanças nas dimensões do cristal. O conceito já é bastante desenvolvido em tweeters e motores, mas também encontra espaço no ramo de óptica, especificamente no alinhamento de dispositivos como espelhos e lentes e em microscópios de força atômica e de tunelamento para manter a distância da ponta da amostra. Talvez a melhor propriedade desses atuadores seja a capacidade de produzir movimentos oscilatórios de altíssimas frequências quando condicionados por um sistema mecânico.

Figura 7 - Estrutura do material piezoelétrico

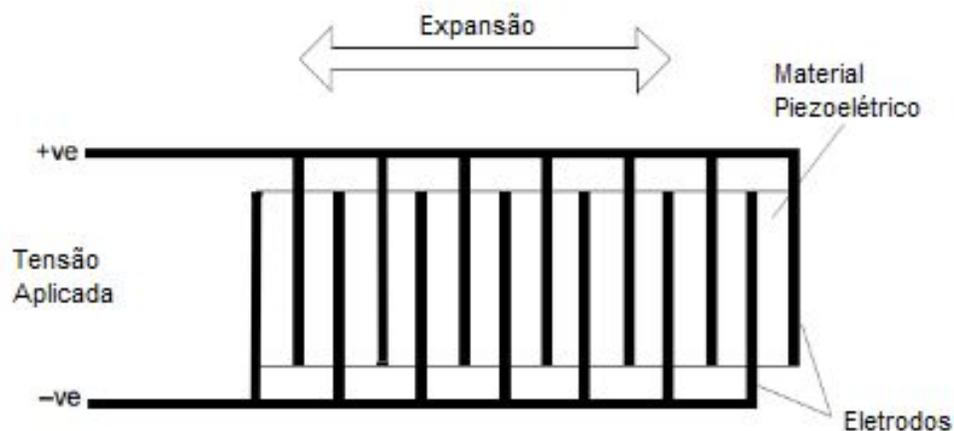


Fig7: Esquemática do piezoelétrico utilizado no nosso sistema de microposicionamento

Fonte: Adaptação de “Piezo-electric actuator schematic diagram” -BNT001/IR Benchtop Nanotrak Controller User Guide - THORLABS.

O gradiente de campo elétrico necessário para produzir uma quantidade apreciável de expansão no material é bastante grande. De forma que, para evitarmos excessivas voltagens no equipamento, o atuador é construído em uma estrutura de camadas (Figura 7) constituída por diversas lâminas de material piezoelétrico envoltas por eletrodos [8]. Com essa configuração, a distância entre os eletrodos é bastante pequena e um alto gradiente de campo pode ser obtido para voltagens modestas de 75V.

Essa aplicação é fundamental e será explorada neste trabalho uma vez que é através dela que o alinhamento do dispositivo será possível, assim como o controle durante o acoplamento da fibra óptica.

3.4 Controlador Proporcional-integral-derivativo

PID é o nome dado a um controlador do tipo proporcional-integral-derivativo que utiliza um mecanismo de realimentação e *laço* para controle de sistemas em geral [16]. Um PID calcula continuamente um valor de erro, que é definido como sendo a **diferença entre um valor desejado e um valor medido** por um processo. O controlador então tenta minimizar o erro ajustando uma variável de controle para um novo valor - essa variável pode ser uma tensão sobre um filamento, a corrente, ou, como é interessante para este trabalho, a posição no espaço de algum objeto.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (\text{Equação 5})$$

Eq5: O novo valor da variável de controle é expresso pela soma de três técnicas matemáticas diferentes, sendo:

$u(t)$: Variável de controle em certo instante. Qualquer medida que deseja ser controlada em um processo.

$e(t)$: Erro. A diferença entre o valor desejado da medida e o valor medido em um instante. Para a nossa aplicação, é a distância do ponto ideal de alinhamento.

K_p : Constante de ganho proporcional. Ajustável pelo usuário para calibração.

K_i : Constante de ganho integral. Ajustável pelo usuário para calibração

K_d : Constante de ganho derivativo. Ajustável pelo usuário para calibração.

A equação geral do funcionamento de um PID (Eq5) explicita as três técnicas matemáticas utilizadas para descrever o comportamento do dispositivo. A variável de controle, $u(t)$, é calculada através da soma de três contribuições, obtidas através da

medida do erro, multiplicadas por constantes de ganho, ou parâmetros de controle, K_p , K_i e K_d - ganho proporcional, integral e derivativo, respectivamente [17]. As contribuições somadas determinam o novo valor de $u(t)$ para o qual o controlador ajusta o sistema e repete o ciclo comparando novamente com o valor alvo de posição desejado, recalculando o valor da variável de controle. Para o caso de controle em duas dimensões dois controladores PID são utilizados, um para cada eixo, e as variáveis de controle corrigem desvios em um plano para o ponto fixo de interesse [18].

Em um controle por PID a ferramenta proporcional serve como análise do erro para valores presentes da medida [2]. O valor de saída é proporcional ao valor atual do erro calculado. A resposta então pode ser calibrada ao multiplicarmos o erro por uma constante (K_p), que é chamada também de constante proporcional de ganho. Um ganho muito alto resulta numa mudança grande na variável de controle e o sistema pode facilmente se tornar instável [3]. Por outro lado, um ganho pequeno resulta em uma resposta pequena e em um controlador pouco sensível a mudanças no sistema.

A contribuição integral é a soma dos erros instantâneos através do tempo [2], resultando no que interpretamos como um *offset* acumulado que será corrigido. O valor do erro é então multiplicado por uma constante (K_i) que permite o controle do ajuste feito pelo controlador. O termo acelera a convergência do processo em direção ao ponto desejado e elimina o erro residual do controlador puramente proporcional [3]. Todavia, como é uma acumulação de erros que já aconteceram, se este for calibrado corretamente, pode ocasionar uma resposta que excede à necessária para corrigir o sistema, o que é chamado de *resposta excedente*.

Figura 8 - Diagrama Cíclico de um controlador PID

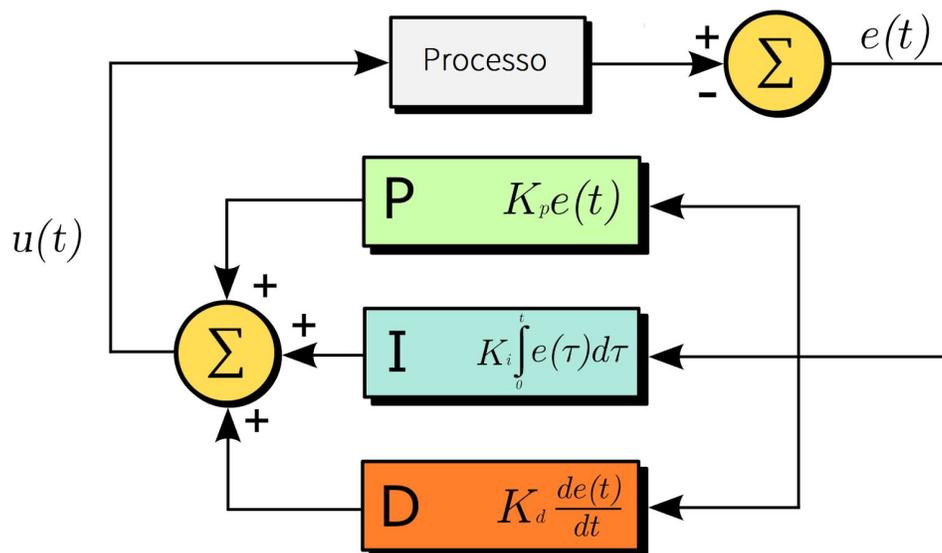


Fig8: Diagrama simples de um laço PID. O processo resulta em uma medida cujo erro é obtido por comparação com um valor desejado. Técnicas de proporcionalidade, integração e derivação analisam o valor do erro no tempo e retornam uma correção que tem como objetivo minimizar o erro de forma a manter a estabilidade do sistema.

Fonte: Adaptação de “PID controller overview” de Arturo Urquizo – Wikimedia

Já a diferenciação serve para estimar a tendência dos valores futuros de erro através da taxa de variação atual dos valores de erro [2]. O termo é calculado ao determinarmos a inclinação da reta do erro pelo tempo e multiplicarmos isso pela constante de ganho derivativo (K_d). Como é uma leitura do comportamento do sistema, com o passar do tempo ele melhora a resposta e a estabilidade do mesmo. Apesar disso, a diferenciação é implementada em apenas 25% das aplicações de PID, uma vez que apenas o uso das técnicas proporcional e integral dão excelentes resultados e o impacto na estabilidade não é tão proveitoso quanto comparado à tarefa de calibração, o qual é de difícil implementação [19].

O grande trunfo de um controlador PID (Figura 8) é que ele depende apenas de uma medida variável de um processo e não do conhecimento do processo em si - isso faz com que ele seja amplamente aplicado [19]. Porém, o conhecimento do processo pode ser extremamente útil para calibrar um controlador e melhorar os seus resultados [3]. O comportamento ideal é caracterizado pela regularidade do sistema em se livrar de perturbações e continuar em um valor desejado, e na capacidade de acompanhar mudanças caso o valor desejado seja redefinido. Em muitos casos também é necessário que não ocorra *resposta excedente* do sistema, uma vez que isso pode significar falta de segurança no procedimento.

Figura 9 - Calibração de um dispositivo PID.

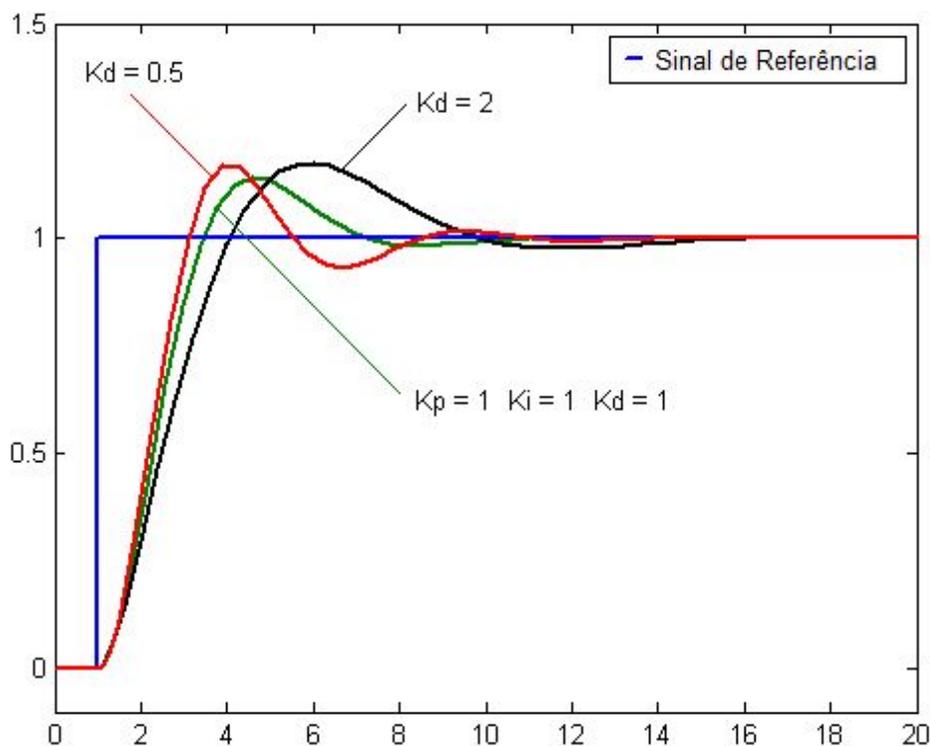


Fig9: Gráfico da variável do processo pelo tempo, utilizada para ilustração do comportamento do sistema para valores fixos de K_p e K_i e três valores diferentes de K_p . O processo básico de calibração consiste em manter dois valores constantes enquanto se varia outros, de acordo com o comportamento necessário para aplicação.

Fonte: Adaptação de “Plot of PV vs time, for three values of Kd (Kp and Ki held constant)” de Skorkmaz – Wikimedia

A tarefa de calibração do controlador PID (Figura 9) se chama *laço tuning* e é caracterizada pelo ajuste dos coeficientes de ganho para se obter os melhores valores possíveis de controle do sistema [3] [19]. Um controlador devidamente calibrado é aquele que responde com agilidade e de forma estável às alterações no sistema. O procedimento de calibração geralmente consiste em fixar um dos parâmetros de ganho enquanto se varia os outros e se observa a resposta do controlador. Adicionalmente, técnicas como pré-alimentação com uma medida direta do sistema ou utilização de controladores conectados em cascata, auxilia a tarefa de calibração em sistemas complexos e com características não lineares.

Uma das metas do presente trabalho é utilizar esse tipo de controlador PID para orientar a tensão aplicada sobre os atuadores piezoelétricos. De forma que eles possam responder a diferenças nas medidas de intensidade, que é uma medida direta da eficiência do acoplamento, e reposicionar a fibra para a posição de maior intensidade sempre que ocorrer alguma perturbação no sistema ou quando o sistema for alinhado para primeiro uso. O controlador PID para essa aplicação deve ser calibrado para translado em micrômetros na posição da fibra quando a eficiência do acoplamento for reduzida, corrigindo assim o posicionamento com os atuadores.

3.5 Sistema e Montagem

O sistema de posicionamento da fibra óptica em escala micrométrica a ser utilizado neste trabalho consiste de um módulo produzido pela companhia THORLABS formado por uma base com posicionadores para o acoplamento e outra parte é por um módulo eletrônico onde é feita a comunicação dos atuadores piezoelétricos com referência ao

signal recebido da fibra óptica. A comunicação pode ser estabelecida com outra fibra, com um feixe de um laser, ou outros dispositivos ópticos [7] - apenas sendo necessário que exista uma variação na tensão ao modificarmos a posição desses objetos.

No nosso caso, o laser é fixado usando um sistema de suportes ópticos e a fibra óptica é posicionada no módulo controlado pelos atuadores piezoelétricos que movimentam a fibra em dois eixos. O posicionador deve ajustar a posição da fibra até que a potência do sinal transmitido seja a maior possível e manter essa posição pelo tempo desejado. A Figura 10 ilustra, de maneira simples, a ligação entre as duas partes mencionadas sobre o módulo de posicionamento.

Figura 10 - Diagrama de blocos do sistema

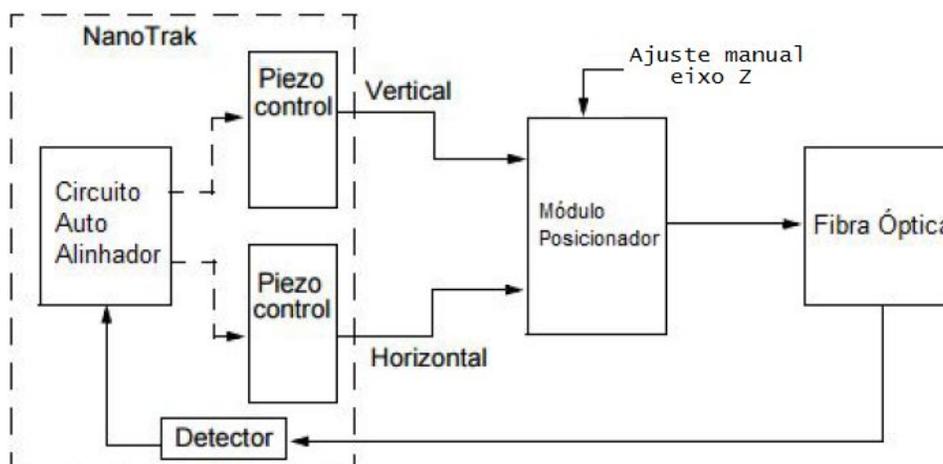


Fig10: Diagrama de blocos do funcionamento do sistema. A seção dentro da linha tracejada é o módulo eletrônico com os controladores piezoelétricos e a parte fora da linha tracejada é o posicionador que recebe o sinal de controle do módulo e a fibra óptica a ser acoplada.

Fonte: Adaptação de “Nanotrak laço Control” - BNT001/IR Benchtop NanoTrak
Controller User Guide – THORLABS

O módulo consiste de um fotodiodo e um amplificador, um *laço* de controle proporcional e integral ajustável, e dois canais de alta tensão com circuitos amplificadores para controlar dois atuadores piezoelétricos conectados ao estágio de posicionamento [8]. O *laço* de controle tem a tarefa de maximizar o sinal de acoplamento através do ajuste das saídas de alta tensão para deslocar fisicamente o dispositivo óptico que está sendo otimizado. Isto é feito através da imposição de uma pequena voltagem senoidal nas saídas de alta tensão, que é denominado sinal de modulação/referência, com um atraso de fase de 90° entre as duas saídas (entre os dois eixos de posicionamento), resultando em um movimento circular (figura abaixo). Essa pequena voltagem senoidal é ajustável pelo usuário e define a região ao redor do ponto no centro do círculo de varredura em que o sistema oscila.

Figura 11 - Sinal aplicado sobre os piezos

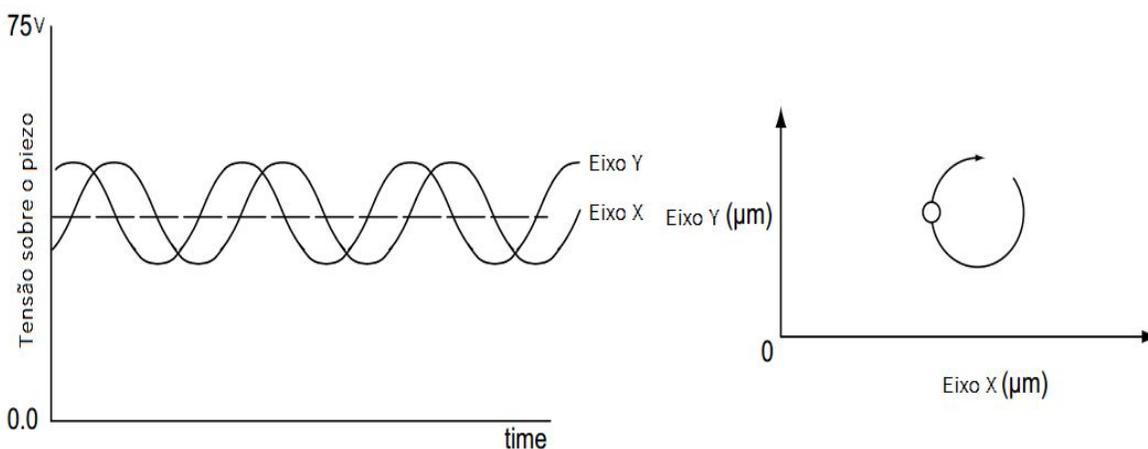


Fig11 - Uma tensão senoidal é aplicada sobre cada um dos piezos que representam os eixos de acoplamento do sistema óptico. Os sinais possuem diferença de fase de 90 graus, isto confere um comportamento circular para o sistema de varredura.

Fonte: Adaptação de “Piezo circular motion” - BNT001/IR Benchtop NanoTrak
Controller User Guide - THORLABS

O controlador PID utilizado no sistema é um controlador do tipo proporcional-integral. Os parâmetros do controlador podem ser modificados manualmente pelo usuário para uma tentativa de calibração (em um primeiro uso) ou podem ser determinados automaticamente através do sistema. O controlador utiliza um método que induz um impulso proporcional à intensidade do acoplamento inicial no sistema [8], para então calcular os valores ótimos dos parâmetros do controlador. Parâmetros como *tempo de subida*, *resposta excedente*, *tempo de resposta* e estabilidade são ajustados através desse método para obtermos a melhor resposta possível.

Através da leitura do sinal transmitido pelo acoplamento óptico ao redor desse movimento circular, o algoritmo do sistema consegue determinar um gradiente de sinal. A voltagem que cai sobre os atuadores é então ajustada - através da aplicação de um sinal dc - para deslocar o círculo de leitura em direção ao aumento de sinal. Quando o dispositivo encontra o ponto ideal, o gradiente detectado pela varredura circular é nulo e a posição dos atuadores são registradas e mantidas. O tamanho da varredura circular pode ser controlado pelo usuário [8] para que tenha o tamanho compatível com o acoplamento sendo otimizado (Figura 12), que tipicamente deve ser da ordem de 1/10 ou 1/20 da largura a meia altura da gaussiana que descreve o sinal.

Figura 12 - Diâmetro do círculo de varredura

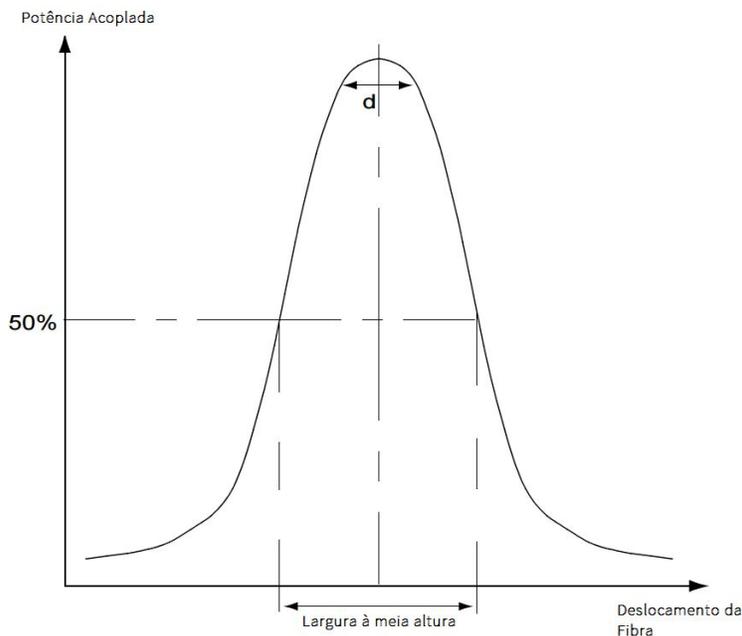


Fig12 - O diâmetro do círculo em relação à gaussiana que descreve o sinal emitido pela fonte. Caso o diâmetro de varredura seja muito grande ou muito pequeno a sensibilidade do algoritmo de detecção do gradiente é afetada e o sistema responde de maneira ineficiente para localizar o ponto ótimo.

Fonte: Adaptação de “Nanotrak laço Control” - BNT001/IR Benchtop NanoTrak
Controller User Guide - THORLABS

Para compreender os princípios envolvidos no alinhamento, utilizamos uma simplificação usando apenas um eixo. O atuador piezoelétrico faz uma varredura com a distância determinada pelo usuário ao longo de um eixo, procurando por um sinal de tensão que será detectado pelo sistema através da fibra. Ao varrer uma distância específica ele detecta se naquele alcance foi medido algum nível diferente de sinal e translada o posicionador para aquela posição [8]. Uma vez na nova posição, ele repete o procedimento tentando identificar novamente o sentido no qual o sinal de tensão aumenta. Quando alinhamos devidamente uma fibra e uma fonte de luz o sinal de

tensão é o máximo possível e o sinal que movimenta os piezoelétricos é definido como sendo o sinal de referência para o sistema.

Se a fibra é deslocada para qualquer um dos lados, a potência do sinal diminui [8]. Caso a fibra sofra uma perturbação, como, por exemplo, uma oscilação mecânica, essa perturbação gera um sinal que possui amplitude, frequência e diferença de fase em relação ao sinal de referência. Tomemos como exemplo um deslocamento para a posição A, como na figura 13. Esse deslocamento gera um sinal que é proporcional a intensidade da perturbação que o causou. Esse sinal é analisado através de uma transformada de Fourier e são obtidas informações da amplitude, das frequências presentes no sinal e da diferença de fase deste sinal em relação ao sinal de referência. Uma vez que a diferença de fase é obtida, o algoritmo determina o sentido da correção da posição através do sinal da diferença de fase [8]. A intensidade da correção é obtida através da amplitude - uma vez que o sinal de tensão sob os piezos corresponde a uma posição no espaço e o alcance dos piezos é conhecido.

Figura 13 - Potência acoplada e desalinhamento

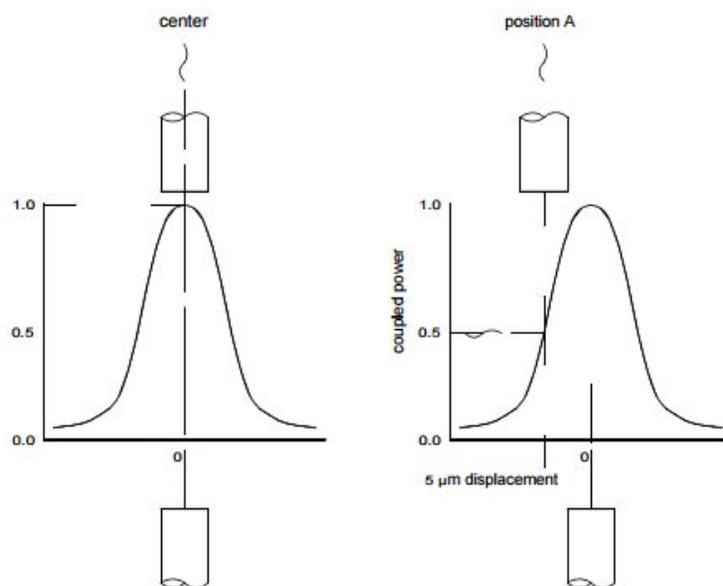


Fig13: A componente AC do sinal obtido pelo PID gerada por uma oscilação mecânica ou térmica. As amplitudes das duas oscilações são proporcionais.

Fonte: Adaptação de “AC component of optical power” - BNT001/IR Benchtop
NanoTrak Controller User Guide - THORLABS

Na realidade, a fibra oscila tanto na direção horizontal quanto vertical. O sinal que desloca a posição da fibra é comparado com as diferenças de fases horizontal e vertical dos sinais de referência, o que resulta em dois valores de erro, um para cada direção. Como o erro é definido onde existe o maior valor de tensão, ele é relativo à posição da fibra, de forma que o sinal usado para controlar os piezos é também empregado para alinhar o sistema até que o erro seja nulo.

Resumidamente, após o posicionador encontrar a posição ideal de acoplamento, se a fonte ou a fibra que recebe o sinal se moverem levemente (como os movimentos causados por vibrações mecânicas ou térmicas) a perda de sinal é detectada e o PID obtém um valor de erro. O sinal ac gerado pela vibração tem sua diferença de fase e amplitude obtidas através da transformada de Fourier, que são utilizadas para corrigir a posição deslocada, o que se dá pela minimização do sinal de erro, ajustando a tensão nos piezos para manterem o máximo de acoplamento [7], processo que se dá o nome de *rastreamento*. Além do modo *rastreamento* o sistema oferece o modo *trava*, no qual os piezos são fixados em uma posição para manter o mesmo nível de sinal depois que o *rastreamento* já ocorreu.

A interface que permite a troca entre os modos além do controle de outras características do sistema é bastante prática e intuitiva (Figura 14).

Figura 14 - Interface de controle

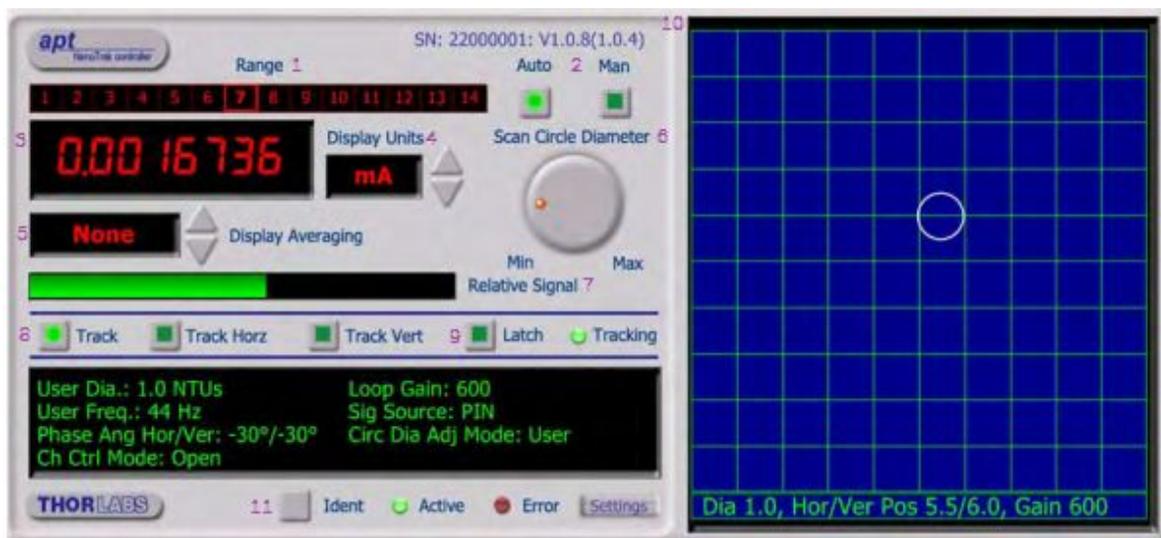


Fig14 - A interface de controle do módulo de posicionamento automático.

Fonte: Adaptação de “Nanotrak Display” - BNT001/IR Benchtop NanoTrak Controller
User Guide – THORLABS

1 - *Range* - Mostra a faixa atual de medição do nível de sinal acoplado. O sistema funciona entre 3 nanoampères e 10 miliampères.

2 – *Auto/Man* - Passagem automática ou manual entre as faixas de medição do nível de sinal acoplado.

3 - *Digital Display* - Mostra o valor do nível de sinal acoplado medido.

4 - *Display Units* - Escolhe entre ampères, watts e decibéis, que são calculados através de fatores de conversão e no caso de decibéis depende do comprimento de onda utilizado.

5 - *Display Averaging* - Permite fazer uma média da medida em um diferente número de pontos resultando em um *delay* de amostragem pequeno. Para nenhuma média a taxa de amostragem é de 10Hz.

6 - *Scan Circle Diameter* - Controle do tamanho do círculo de medida. Depende do alcance dos piezos. Para o sistema utilizado varia entre 0,1 e 10 microns.

7 - *Relative Signal Power* - Forma conveniente de visualizar o nível de sinal acoplado. O tamanho da barra é refletida proporcionalmente na faixa de corrente/potência/decibéis que está sendo medida.

8 - *Track/rastreamento Indicator* - Permite a seleção do modo *rastreamento* para o sistema. É possível realizar o rastreamento para apenas a componente horizontal ou vertical. O *led* indicador de rastreamento avisa quando o sinal recebido ultrapassa o valor mínimo definido pelo usuário.

9 - *Trava* - Prende os atuadores na posição atual, desabilitando o modo de varredura do círculo.

10 - *CRT Display* - Visualização da posição dos atuadores utilizados. Cada seção corresponde a 1 micron. Na parte inferior alguns parâmetros são mostrados: o diâmetro atual do círculo, as coordenadas de cada posição e o ganho do laço de controle.

11 - *Settings/Ident/Active/Error* - Abre o painel de opções, o que permite o controle de algumas variáveis do sistema, como as constantes de ganho do controlador PID e o tipo de receptor de sinal utilizado além do controle de tensão sobre os atuadores e obtenção do *log* do sistema. Os *leds* indicam, respectivamente, a porta usada no módulo eletrônico, se o sistema está ativo e se algum erro de conexão foi encontrado.

A interface permite a configuração de diferentes parâmetros do equipamento através de seleção de botões, sem que o usuário precise entrar com valores numéricos. Porém, o menu de opções permite acesso a configurações avançadas, como os parâmetros de ganho do controlador e do circuito, além de correções de fase de cada um dos atuadores. Também é possível escolher o valor mínimo de sinal aceitável para iniciar o modo *rastreamento* e modificar a escala mostrada no ecrã – além de outras configurações que dependem do tipo de sinal que o sistema recebe através do conector do módulo eletrônico. As configurações mais importantes para a realização do experimento estão representadas na figura abaixo (Figura 15).

Figura 15 - Configuração básica do sistema

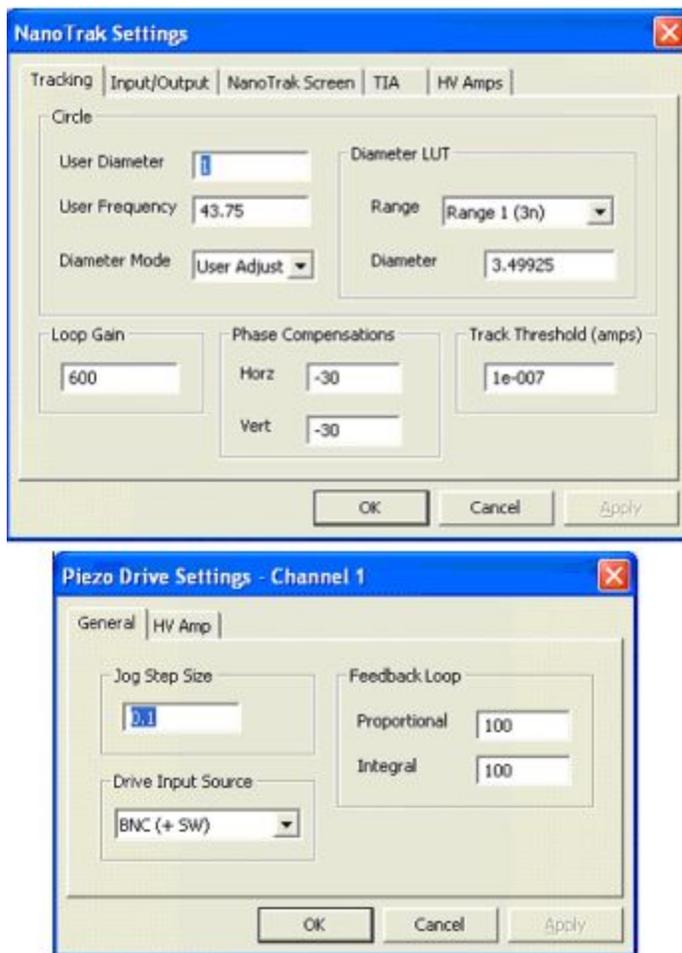


Fig15: Opções de configuração do sistema.

Fonte: Adaptação de “Nanotrak setup” - BNT001/IR Benchtop NanoTrak Controller
User Guide – THORLABS

Definidas as bases do funcionamento do sistema podemos começar a realizar alguns experimentos, a fim de testar a resposta do equipamento e sua precisão. Começaremos descrevendo um experimento simples de alinhamento um tanto quanto robusto para exemplificar o procedimento de procura do valor ideal e de manutenção nessa posição e então partiremos para aplicações mais sofisticadas como fibra óptica e fibra de produção de pulsos contínuos.

3.6 Experimentos

Podemos explorar o sistema, sua precisão e a agilidade de resposta ao testar algumas aplicações simples antes de irmos em direção a aplicações mais complexas como fibras ópticas multimodo e monomodo. Os experimentos foram montados em uma ordem crescente de dificuldade de acoplamento para explorar a sensibilidade do sistema.

Experimento 1 - Par emissor/receptor infravermelho

Neste experimento foram utilizados:

- Emissor infravermelho
- Receptor infravermelho
- APT-Nanotrak
- Arduíno - como um circuito alimentador
- Cabos para comunicação do receptor com o módulo eletrônico

O primeiro experimento foi realizado para compreender o funcionamento do equipamento e obter uma primeira impressão da precisão do controle e da agilidade na

resposta. Um par emissor/receptor infravermelho foi utilizado (Figura 16) para alcançar esse objetivo. O par foi obtido de um mouse onde é utilizado para controlar o deslocamento da posição do ponteiro - geralmente cada mouse possui um par para cada direção de movimento. Um circuito utilizando as saídas de terra e 5V de um arduíno alimentava o emissor e o receptor que eram posicionados conforme a imagem abaixo, de uma forma que estivessem aproximadamente alinhados.

Figura 16 - Montagem do primeiro experimento

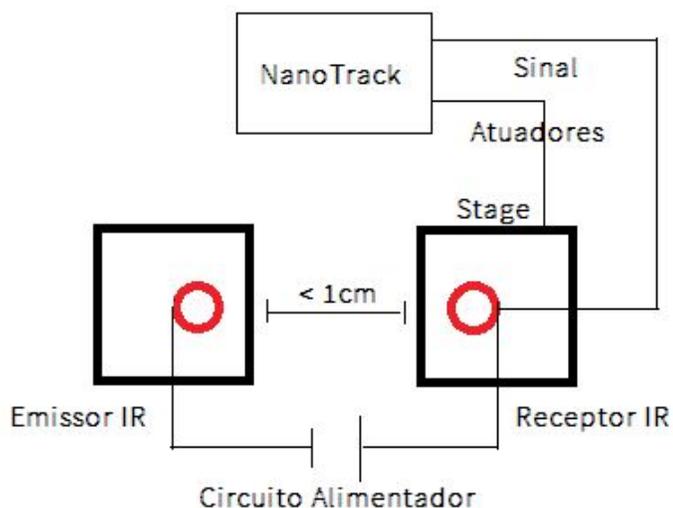


Fig16: Esquemática da primeira montagem. Os círculos vermelhos representam o emissor e o receptor infravermelho obtidos de um mouse antigo. O circuito alimentador é saída de tensão de um arduíno duemilanove ligado a uma protoboard.

Através da interface no computador foi selecionado o procedimento de alinhamento automático e o círculo de varredura indicou a posição onde o máximo de sinal era obtido entre o par. Como os dois lados do sistema estavam firmemente estabilizados a posição onde o máximo de sinal é transmitido é constante. Então, movimentando os posicionadores a posição do receptor foi modificada para uma posição diferente, ocasionando perda de sinal. O sistema reage ajustando a posição do receptor de volta para onde o máximo de sinal é transmitido. Porém, o alcance dos piezoelétricos é em escala micrométrica, de forma que se desalinhamos por uma fração de milímetros o

par de piezos, o sistema não consegue atingir o ponto máximo sem realizar o procedimento de *rastreamento* novamente.

Uma vez dentro da região de alcance dos piezoelétricos, é possível realizar testes de resposta do equipamento alterando os parâmetros do controlador proporcional-integral através da interface. Ao alterar os parâmetros estamos modificando o comportamento do sistema na forma como ele converge até o ponto de máximo sinal. O diâmetro do círculo de varredura escolhido automaticamente pelo sistema foi de 5 microns. Os resultados são explorados no próximo capítulo junto com os resultados dos outros dois experimentos.

Experimento 2 - Laser e Fibra Óptica Multimodo

No segundo experimento foram utilizados:

- Laser Pointer de 405 nm
- Cabo de fibra óptica multimodo
- Detector de fotodiodo NTA009 Thorlabs

O detector é posicionado na saída do cabo e conectado diretamente no módulo para que o sinal obtido pela iluminação seja usado no alinhamento.

No segundo experimento substituímos a fonte de luz por um laser de comprimento de onda de 405 nanômetros. O desafio no segundo experimento foi maior uma vez que o spot do laser é menor do que a superfície ativa do emissor IR usado no primeiro experimento. Na segunda montagem utilizamos um cabo de fibra óptica multimodo, com diâmetro do núcleo próximo a 80 micrometros, conectado a um detector próprio do equipamento para a faixa do visível.

Figura 17 - Esquemática do Segundo Experimento

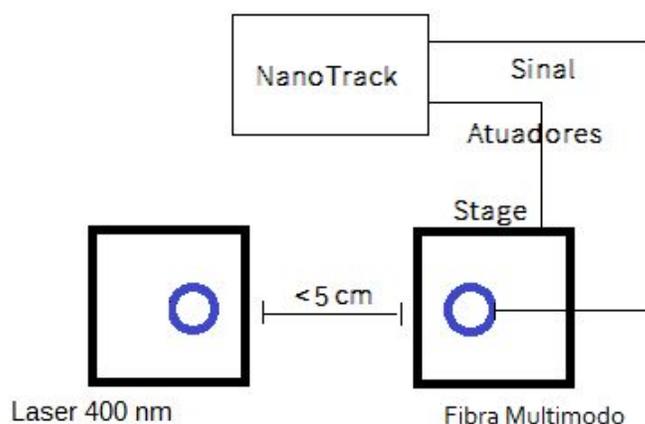


Fig17: Esquemática do segundo experimento. A fonte de luz agora é um laser pointer e ao invés de um sensor usamos uma fibra óptica multimodo para o acoplamento - ambos representados pelos círculos azuis. O fotodiodo conectado a saída da fibra faz a comunicação com o módulo eletrônico.

O procedimento utilizado foi semelhante ao primeiro experimento. Primeiro foi feito um alinhamento manual para uma posição na região do acoplamento ideal. E então, o modo de *rastreamento* foi selecionado e o equipamento passou a procurar pelo ponto ótimo. Uma vez que o ponto ótimo foi encontrado e o equipamento se encontrava na região de resposta dos piezos, a posição da fibra foi manualmente modificada sob diferentes parâmetros de ganho do controlador (K_p e K_i). O diâmetro do círculo de varredura foi definido automaticamente pelo programa como sendo de 2 microns.

Experimento 3 - Laser e Fibra Óptica Monomodo

No terceiro experimento foram utilizados:

- Laser pointer 405 nm
- Fibra óptica monomodal
- Detector de estado sólido DET550 da OPTRON
- Dois espelhos posicionadores
- Objetiva com 3 centímetros de ponto focal

No terceiro experimento utilizamos a mesma fonte de luz do segundo experimento, um laser de comprimento de onda de 405 nanômetros, e uma fibra óptica monomodo. O desafio no terceiro experimento foi maior porque o núcleo de uma fibra monomodo possui um diâmetro nominal de 8 micrometros. O fato de interagirmos com o sistema para o procedimento de alinhamento gera instabilidade. É necessária extrema cautela para encontrar uma região onde o modo de *rastreamento* seja ativado e o programa consiga otimizar e manter o acoplamento por si só. A figura 18 explicita a montagem realizada nesta segunda etapa.

Figura 18 - Montagem do terceiro experimento

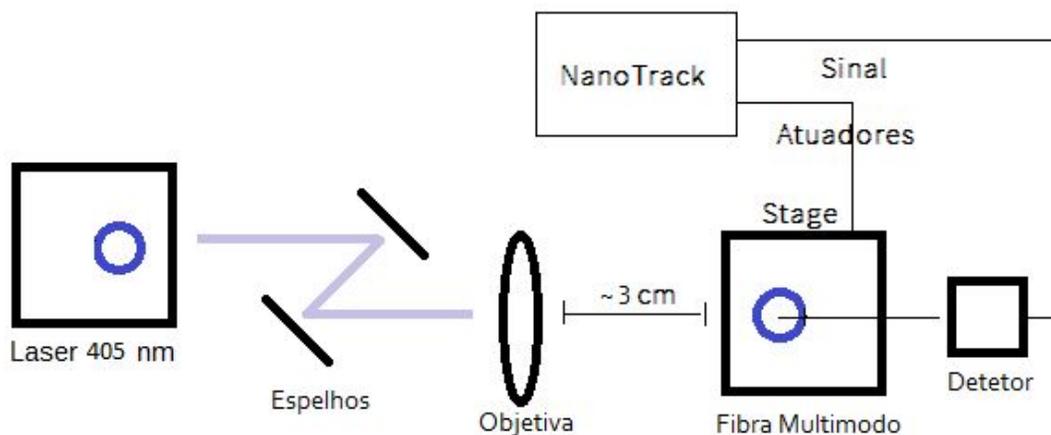


Fig18: Esquemática da montagem do terceiro experimento. Espelhos foram necessários para controlar a posição do spot em relação a fibra. Um detector externo precisou ser utilizado na saída da fibra pois ela não possui o suporte de um cabo para ser conectado direto no equipamento. Os círculos azuis representam a fonte de luz e a fibra óptica monomodo.

No terceiro experimento foi utilizada uma fibra óptica monomodo sem os conectores de um cabo normal, ou seja, apenas o núcleo da fibra revestido pelo revestimento protetor. Nessa situação não podemos ligar o cabo, como foi feito no segundo experimento, diretamente no módulo do equipamento, utilizamos um detector sensível ao sinal de saída da fibra para que tenhamos um sinal de voltagem que então é ligado diretamente ao módulo para ser utilizado no alinhamento. Uma objetiva foi necessária nessa montagem para focalizar o feixe do laser em uma área de dimensões aproximadas àquelas do perfil da fibra utilizada. Além disso, dois espelhos foram posicionados para que fosse possível alinhar o feixe com o eixo da objetiva. O procedimento para esse experimento foi similar aos dos anteriores, todavia, a montagem requer maior precisão no ajuste das posições tanto do feixe quanto da fibra.

Primeiramente, o feixe foi posicionado através do centro da objetiva com distância focal de 3 centímetros. Inicialmente, para o pré-alinhamento da fibra, os micro posicionadores foram utilizados para alinhar a entrada da fibra, devidamente clivada, sob o ponto focal da objetiva. Na outra extremidade, a fibra foi posicionada de frente para um detector sensível ao sinal de 405 nanômetros do feixe e o sinal elétrico do detector foi ligado ao módulo para calibração do alinhamento. Uma vez que o equipamento identifica o ponto ideal, as coordenadas são salvas e é possível testar a resposta do controlador para diferentes parâmetros de ganho (K_p e K_i). O diâmetro escolhido como adequado pelo algoritmo do sistema foi de 0,1 micrômetro.

7 RESULTADOS

O efeito de alterar as constantes de proporcionalidade (K_p) e de integração (K_i) pode ser melhor visualizado nas curvas de calibração (Figuras 19, 20 e 21) cujo par de coordenadas que descreve o centro do círculo é obtido do registro do equipamento. Para todos os gráficos foram utilizados dez medidas de respostas dos controladores PID e as melhores medidas foram selecionadas - isto é, as que o sistema foi estabilizado nos menores tempos. Todos os pontos em todos os gráficos são obtidos do log do equipamento em uma taxa de um ponto a cada 50 milissegundos.

Figura 19 - Curva de calibração: Primeiro experimento

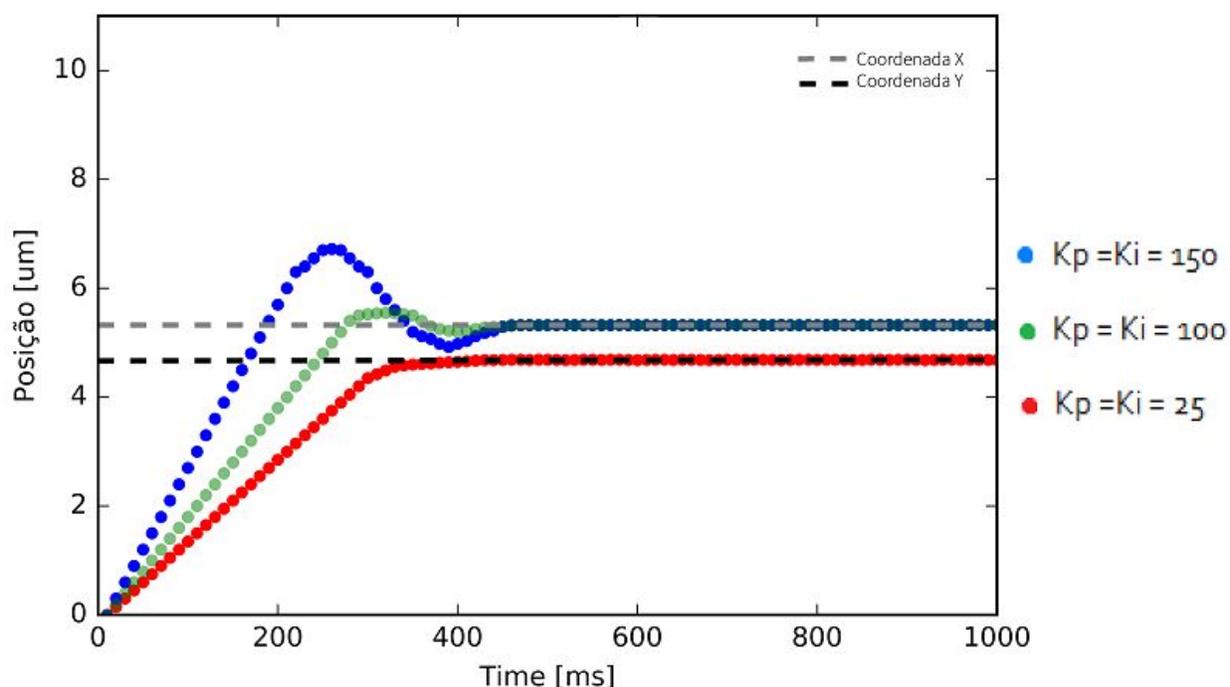


Fig17 - Curvas da posição das coordenadas x e y obtidas após calibração para diferentes parâmetros de K_p e K_i . As curvas azul e verde são tentativas de encontrar a coordenada x da posição ideal e a curva vermelha de encontrar a posição y. A posição final e ideal é representada pela linha tracejada. Para a curva azul $K_p = K_i = 150$. Para a curva verde $K_p = K_i = 100$. Para a vermelha $K_p = K_i = 25$. A curva vermelha representa uma melhor calibração que as outras curvas.

Podemos ver que o equipamento reage de maneira rápida mesmo com diferentes parâmetros para o controlador, pois o ponto máximo é encontrado em um intervalo menor que um segundo, mesmo alterando as constantes de ganho. Isso é uma consequência da facilidade do acoplamento óptico para o primeiro experimento. De fato, o emissor infravermelho emite uma grande quantidade de radiação sobre toda superfície do detector de maneira uniforme, o que resulta em uma grande quantidade de pontos dentro da área de varredura onde a diferença do sinal acoplado é muito pequena do valor máximo possível, e uma vez que o círculo encontra essa região de máximo ele rapidamente converge para o ponto ideal.

O primeiro experimento teve o objetivo de ilustrar o funcionamento de um sistema simples para se acoplar luz. Com a experiência obtida podemos avançar em escala de dificuldade, montando dois cenários mais complexos que o par emissor-receptor infravermelho, pois as fibras ópticas possuem diâmetro muito menor do que a superfície sensível do receptor utilizado.

Figura 20 - Curva de calibração:Segundo experimento

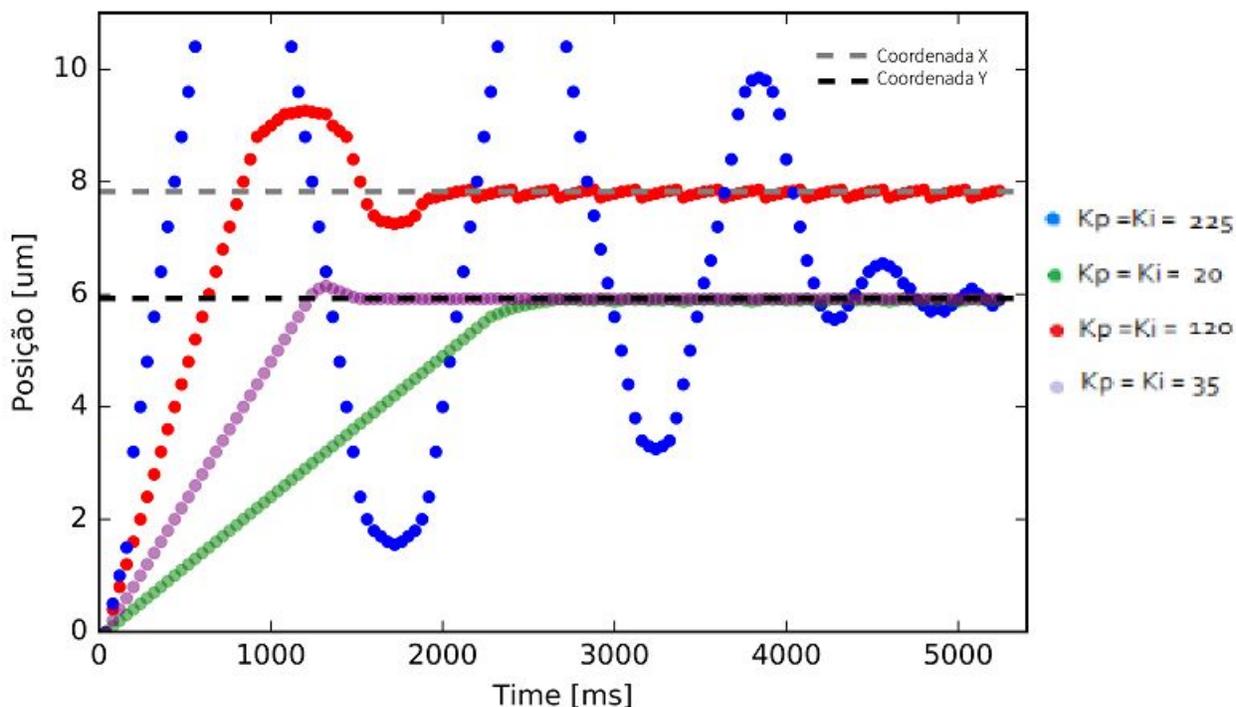


Fig19 - Plot da posição das coordenadas x e y obtidas após calibração para diferentes parâmetros de K_p e K_i . As curvas azul, verde e rosa são tentativas de encontrar a coordenada y da posição ideal e a curva vermelha de encontrar a posição x. A posição final e ideal é representada pela linha tracejada. Para a curva azul $K_p = K_i = 225$ Para a curva vermelha $K_p = K_i = 120$. Para a curva rosa $K_p = K_i = 35$. Para a curva verde $K_p = K_i = 20$. A curva rosa ajusta melhor a posição que as outras duas, em consideravelmente menos tempo.

No segundo experimento já podemos visualizar alguma dificuldade do sistema ao realizar o acoplamento em relação ao primeiro experimento. O núcleo da fibra é muito pequeno o que indica que a região onde o sistema detecta o sinal do laser é também muito pequena. Além disso, o spot do laser é bem menor que o utilizado no primeiro experimento, o que também dificulta o acoplamento de luz. O sistema estabiliza em poucos segundos para o ponto ótimo mas caso as constantes de ganho não estejam devidamente calibradas o sistema tem uma resposta pobre ao cruzar o ponto ótimo e instável ao tentar retornar para ele, uma vez que o tenha identificado, como fica evidente na curva azul.

De fato, o segundo experimento foi importante como um passo intermediário, porque ele ilustrou a dificuldade de uma tarefa de alinhamento considerada simples. Manter o acoplamento se torna muito mais fácil com o controle oferecido pelo sistema. Agora que já testamos as capacidades do equipamento em dois experimentos simples podemos avançar para a última etapa deste trabalho, que é o acoplamento óptico em uma fibra do tipo monomodo.

Figura 21 - Curva de calibração: Terceiro experimento

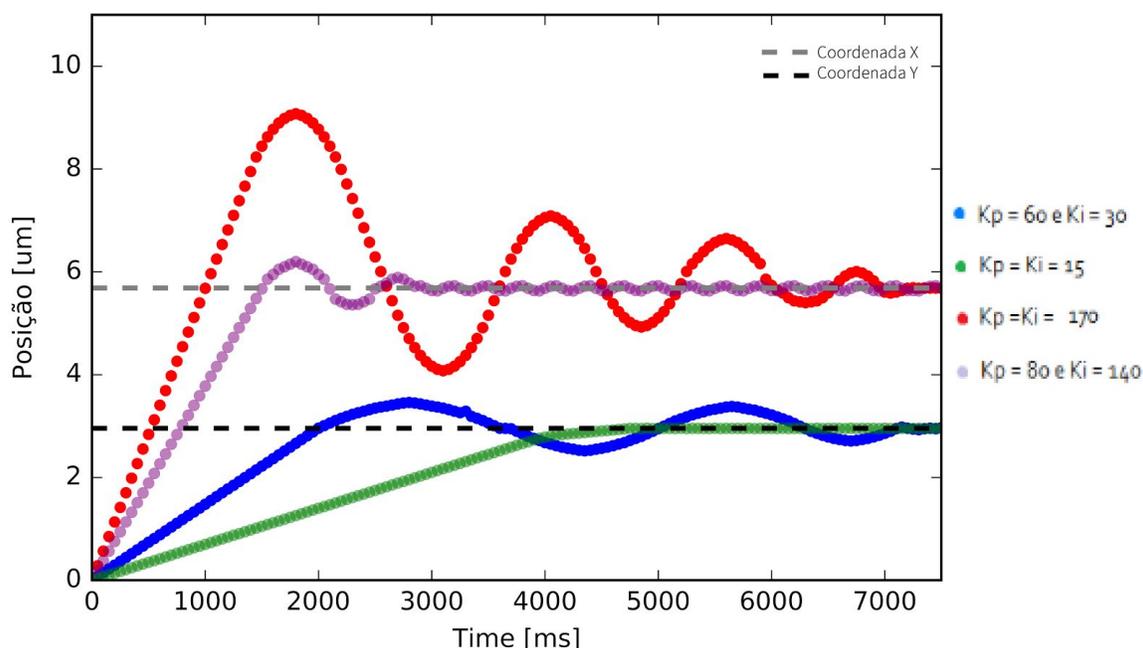


Fig21 - Plot da posição das coordenadas x e y obtidas após calibração para diferentes parâmetros de K_p e K_i . Cada ponto é uma coordenada x ou y obtida do registro do equipamento. As curvas vermelha e rosa são tentativas de encontrar a coordenada x da posição ideal e as curvas azul e verde de encontrar a posição y. A posição final e ideal é representada pela linha tracejada. Para a curva vermelha $K_p = K_i = 170$. Para a curva rosa $K_p = 80$ e $K_i = 140$. Para a curva azul $K_p = 60$ e $K_i = 30$. Para a curva verde $K_p = K_i = 15$. A curva rosa ajusta melhor a posição para o eixo X, e a verde em Y, aproximadamente metade do tempo da curva azul.

Em relação aos outros dois experimentos podemos perceber que os tempos de alinhamento aumentaram e que o diâmetro do círculo diminuiu, porque é necessária

uma maior sensibilidade na identificação do gradiente. Isso ocorre devido à dimensão reduzida do núcleo da fibra óptica e da cintura do feixe, fazendo com que os piezos oscilem sobre uma área bem pequena para que o sinal de realimentação seja de valores precisos do gradiente, deslocando o sistema em direção ao ponto ótimo.

O resultado dos três experimentos pode ser resumido na Tabela 2 e comparados com as limitações do aparelho, para que assim possamos verificar sobre a aplicabilidade em situações de acoplamento com um núcleo ainda menor.

Tabela 2 - Tempo de resposta e diâmetro do círculo de varredura

<i>Montagem</i>	<i>Tempo para Alinhamento</i>	<i>Diâmetro de Varredura</i>
Par Emissor/Receptor IR	400 ms	5 microns
Fibra Multimodo	1200 ms	2 microns
Fibra Monomodo	4000 ms	0.1 microns
Limites do equipamento	-	5 nanometros

Tab 2: O diâmetro nominal das fibras ópticas utilizadas nos experimentos 2 e 3, como foi mencionado anteriormente, é de 80 μm para a multimodo e 8 μm para a monomodo.

Os experimentos foram fundamentais para compreender melhor o funcionamento do módulo de auto-posicionamento e testar a sua sensibilidade em acoplamentos com nível de dificuldade diferentes. Ao observarmos os limites de operação do equipamento vemos que ele consegue controlar os piezos na leitura de um gradiente com um círculo de varredura de até 5 nanometros de diâmetro - mais do que suficiente para alinhamento de uma fibra monomodo e de uma fibra de cristal fotônico, que possui diâmetro aproximado de 5 micrometros. De forma que o sistema é capaz de rastrear o ponto ótimo de um acoplamento com uma fibra de produção de contínuo sem precisar operar nos seus limites de varredura.

Dois pontos ainda são importantes de serem mencionados:

O sistema utiliza o modo de rastreamento para otimizar posições X e Y de um acoplamento óptico. O eixo Z, que corresponde à distância entre a fonte e a fibra óptica em um mesmo eixo, é controlado manualmente pelo usuário e pode ser ajustado através dos micro posicionadores e da visualização da potência transmitida. Todavia essa tarefa é consideravelmente fácil, pois usualmente se trata de posicionar a entrada da fibra sobre o ponto focal de uma objetiva bem conhecida, de forma que os transladores com precisão de dezenas de microns são suficientes.

E, embora o equipamento consiga alinhar automaticamente e manter o alinhamento em seu ponto ótimo, ele ainda precisa de um alinhamento prévio feito pelo usuário para que o sistema esteja dentro do alcance de deslocamento dos piezos - que é de 20 micrometros. Caso contrário, ele não consegue deslocar a fibra a distância necessária para maximizar a potência transmitida. O equipamento precisa ser preso de maneira firme à mesa óptica pois ao interagir com o equipamento para movimentar os micro posicionadores ou acidentalmente causa variações de distâncias maiores que o alcance dos piezos, inviabilizando o rastreamento ou a trava feita pelo módulo.

8 CONCLUSÃO

Realizamos a montagem e a caracterização do equipamento através de testes de desempenho com diferentes níveis de dificuldade - para conhecermos as limitações quanto a sua sensibilidade e prepará-lo para ser utilizado em outras aplicações do laboratório de óptica. Os testes foram feitos através de experimentos que exploravam a resposta do equipamento com diferentes parâmetros do seu controlador proporcional-integral. Esta tarefa, chamada de calibração, depende da dificuldade de alinhamento do acoplamento óptico, que depende das dimensões da fibra, do feixe e da montagem óptica utilizada. Quanto menor as dimensões do acoplamento, menor é a área de varredura deslocada pelos piezos, de forma que o equipamento se adapta para ser capaz de identificar diferentes níveis de sinal e encontrar a posição do máximo navegando através deste gradiente.

Os resultados mostram que o equipamento responde de forma rápida ao alinhar diferentes dispositivos ópticos e ao corrigir flutuações do ponto ideal devido a vibrações no sistema. A montagem de maior dificuldade mostrou que o equipamento conseguiu atuar no sistema ainda longe de suas capacidades limites, revelando que a tarefa de alinhamento em um sistema utilizando fibras de cristal fotônico para produção de contínuo é possível, uma vez que as dimensões são da mesma ordem de grandeza de uma fibra monomodo.

Uma vez que os testes foram concluídos o equipamento se torna disponível para qualquer aplicação envolvendo alinhamento óptico. Como, por exemplo, para a produção de super contínuo com utilização de uma fonte adequada e fibras de cristal fotônico de efeitos não-lineares.

REFERÊNCIAS

- [1] SENIOR, JOHN; (2008) **Optical fiber communications: principles and practice**; Pearson - 3 edition
- [2] WESCOTT, TIM; (October 2000) **PID without a PhD**; EE, Times-India. <http://www.embedded.com/design/prototyping-and-development/4211211/PID-without-a-PhD>
- [3] ÅSTRÖM K.J. and HÄGGLUND T.:(1995) **PID Controllers: Theory, Design and Tuning**; Instrument Society of America 343p.
- [4] PASCHOTTA, RÜDIGER; (2008) **Fibers, from Encyclopedia of Laser Physics and Technology**. RP Photonics. Wiley - 1st Edition.
- [5] SENIOR, JOHN M. and JAMRO M. YOUSIF; (2009) **Optical fiber communications: principles and practice**, 3rd edition. 1127 p.
- [6] ALFRED P. SLOAN;(2004) **City of Light: The Story of Fiber Optics** - Alfred P. Sloan Foundation; Oxford University Press; Rev Exp edition.
- [7] THORLABS; **MAX373D Manual**; At <www.thorlabs.com>; (Ely, January 5, 2011); 24 p. - Accessed July 28, 2016
- [8] THORLABS; **APT NanoTrak Manual**; At <www.thorlabs.com>; (Ely, November 8, 2011); 64 p. - Accessed August 2, 2016
- [9] HECHT, JEFF;(2005) **Understanding Fiber Optics**; Prentice Hall - 5th edition 800p.

- [10] THE FIBER OPTIC ASSOCIATION; "**Optical Fiber**". At <www.thefoa.org> - Accessed June 22, 2016
- [11] AGRAWAL G. P.:(2010) **Fiber Optic Communication Systems**,, Wiley-Interscience 4th edition 626p.
- [12] HARPER, DOUGLAS; **Piezoelectric - Online Etymology Dictionary**; At <<http://www.etymonline.com/>> Accessed June 26, 2016
- [13] ERHART, JIŘI; (2010) **Fundamentals of Piezoelectric Sensorics: Mechanical, Dielectric, and Thermodynamical Properties of Piezoelectric Materials**, Springer 2010 edition. 207p.
- [14] DAMJANOVIC, DRAGAN;(1998) **Ferroelectric, dielectric and piezoelectric properties of ferroelectric thin films and ceramics**; Reports on Progress in Physics 61 (9): 1267–1324p.
- [15] SAITO, YASUYOSHI *et al*; (2004) **Lead-free piezoceramics**; Published online (31 October 2004). Nature (Nature Publishing Group) 432 (7013): 81–87p.
- [16] BENNETT S.; (1993), **A History of Control Engineering 1930–1955**, pp.28–69. Peter Peregrinus.
- [17] DE SILVA, M.M.W.; (Nov 12, 2014), **Discrete PI and PID Controller Design and Analysis for Digital Implementation**. 7p
- [18] TAGUCHI H. AND ARAKI M (2000). **Two-degree-of-freedom PID controllers. Proceedings of the IFAC Workshop on Digital Control: Past, Present and Future of PID Control**, pp. 91–96. Elsevier.

[19] ZHONG, JINGHUA (Spring 2006). "**PID Controller Tuning: A Short Tutorial**".

[20] MARK A. HEALD, JERRY B. MARION - **Classical Electromagnetic Radiation** -
Brooks Cole (1995)

LISTA DE LINKS: IMAGENS

FIGURA 1

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/84/Singlemode_fibre_structure.svg

FIGURA 2

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/5d/RefractionReflexion.svg>

FIGURA 3

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/46/Optical-fibre.svg>

FIGURA 4

https://en.wikipedia.org/wiki/Transverse_mode#/media/File:Selected_modes.svg

FIGURA 5

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ef/Photonic-crystal-fiber-from-NRL.jpg>

FIGURA 6

<http://www.jultrasoundmed.org/content/26/3/283/F1.large.jpg>

TABELA 1

<https://www.asylumresearch.com/Applications/PFMAppNote/PFMImages/Table1.jpg>

FIGURA 8

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/43/PID_en.svg

FIGURA 9

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c0/Change_with_Ki.png