

José Alberto Machado Marques

# Desenvolvimento de uma máquina para alinhamento automático de componentes micro-ópticos



Universidade do Porto

---

Faculdade de Engenharia

**FEUP**

Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

2008



Tese supervisionada por

*Dr. Henrique Manuel de Castro Faria Salgado*

Professor Associado do *Departamento de Engenharia Electrotécnica e de computadores da Faculdade de Engenharia da universidade do Porto*

*Dr. Francisco Manuel Moita Araújo*

Investigador da *Unidade de Optoelectrónica e Sistemas Electrónicos do Instituto de Engenharia de Sistemas de Computadores do Porto*

Presidente do júri: \_\_\_\_\_



## *Agradecimentos*

---

Quero agradecer a todas as pessoas que me ajudaram e motivaram durante a realização deste trabalho.

Entre todos quero destacar os meus orientadores, o Dr. Henrique Manuel de Castro Faria Salgado e o Dr. Francisco Manuel Moita Araújo, pela oportunidade dada com a realização deste trabalho, pelo apoio e motivação prestadas. Um Grande Abraço a todo o pessoal da unidade optoelectrónica e sistemas electrónicos (UOSE), do INESC Porto.

Agradeço também a toda a minha família e amigos por todo o apoio.

Um Obrigado a todos!



## *Resumo*

---

As redes de telecomunicações em fibra óptica encontram-se em grande desenvolvimento, e requerem que os seus componentes micro-ópticos sejam fiáveis e que o seu custo seja baixo. O método de construção destes componentes é um aspecto com elevada importância, pois pode limitar o seu rendimento/custo.

Neste projecto pretende-se desenvolver uma máquina que faça o alinhamento de componentes micro-ópticos para dispositivos de telecomunicações. Este sistema tem de ser capaz de realizar um trabalho com qualidade e de baixos custos. É também iniciado o desenvolvimento de um dispositivo óptico – filtro sintonizável – que será usado em redes de telecomunicações ópticas, e que será montado por este sistema.





# Índice

---

<i>Agradecimentos</i> .....	1
<i>Resumo</i> .....	3
Índice .....	5
Lista de Figuras.....	6
Lista de Tabelas .....	8
Capítulo I - Introdução .....	9
Capítulo II - Estado da Arte .....	11
<b>2.1 Indústria</b> .....	11
<b>2.2 Componentes micro-ópticos</b> .....	17
<b>2.3 Métodos e meios de fixação</b> .....	18
<b>2.3.1 Adesivos</b> .....	20
<b>2.3.2 Soldadura</b> .....	21
<b>2.3.3 Soldadura a laser</b> .....	21
<b>2.4 Dispositivos finais</b> .....	23
<b>2.5 Observações</b> .....	24
Capítulo III – Lentes GRIN .....	25
<b>3.1 Introdução</b> .....	25
<b>3.2 Lentes GRIN</b> .....	25
<b>3.2.1 Propagação da luz em lentes GRIN</b> .....	25
<b>3.2.2 Cálculo das perdas por acoplamento</b> .....	30
<b>3.3 Observações</b> .....	40
Capítulo IV – Fabry-Pérot .....	41
<b>4.1 Introdução</b> .....	41
<b>4.2 Interferómetro Fabry-Pérot</b> .....	41
<b>4.3 Observações</b> .....	50
Capítulo V – Implementação da máquina de alinhamento.....	51
<b>5.1. Introdução</b> .....	51
<b>5.1.1. Plataforma Mecânica</b> .....	51
<b>5.1.2. Máquina de Visão</b> .....	54
<b>5.1.2.1. Desenvolvimento da máquina de Visão</b> .....	54
<b>5.1.3. Software de controlo e de aquisição</b> .....	57
Capítulo VI – Alinhamento das lentes GRIN.....	62
<b>6.1 Lente GRIN - fibra</b> .....	62
<b>6.2 Lente GRIN – Lente GRIN</b> .....	71
<b>6.3 Espelho – Lente GRIN</b> .....	84
Capítulo VII – Conclusões e Trabalho Futuro .....	92
<b>7.1 Conclusões</b> .....	97
<b>7.2 Optimizações do sistema de alinhamento</b> .....	92
<b>7.3 Desenvolvimentos futuros</b> .....	92
Referências .....	98

## Lista de Figuras

---

Figura 2.1 – Esquema de um circulador[14] .....	13
Figura 2.2 – Esquema técnico de um circulador (dimensões em cm)[15].....	13
Figura 2.3 – Integração optoelectrónica com alinhamento de diversos componentes ópticos[9].....	13
Figura 2.4 – Simulação de uma ferramenta automática para colocação de componentes[3] .....	14
Figura 2.5 – Montagem do díodo laser de 980 nm[12].....	15
Figura 2.6 – Loop de controlo usado para o alinhamento de componentes micro-ópticos	16
Figura 2.7 – Fibra óptica com revestimento metálico[17] .....	19
Figura 2.8 – Colagem com adesivo.....	20
Figura 2.9 – Diferentes tipos de adesivos .....	20
Figura 2.10 – Simulação de uma máquina de soldadura a laser[18] .....	21
Figura 2.11 – Laser de soldadura.....	21
Figura 3.1 – Diferentes tipos de lentes GRIN[21] .....	26
Figura 3.2 – Variação do índice de refração de uma lente GRIN[21] .....	26
Figura 3.3 – Sistema de acoplamento de luz utilizando duas lentes GRIN[22].....	27
Figura 3.4 – Distribuição do feixe à saída da lente GRIN[22].....	30
Figura 3.5 – Distribuição do feixe que pode ser acoplado na fibra através da lente GRIN[22] .....	31
Figura 3.6 – Tipos de desalinhamento: a) separação entre lentes; b) deslocamento lateral; c) desvio angular[22] .....	32
Figura 3.7 – Imagem com os três tipos de desalinhamento[22].....	32
Figura 3.8 – Dependência teórica para a evolução das perdas com a variação da distância entre lentes GRIN .....	36
Figura 3.9 - Dependência teórica para a evolução das perdas com o deslocamento lateral entre lentes GRIN .....	37
Figura 3.10 – Perdas do sistema quando se aplica um desvio angular .....	38
Figura 3.11 – Variação do diâmetro do feixe em função da separação entre lentes .....	39
Figura 3.12 – Variação das perdas por inserção com a separação entre lentes.....	40
Figura 4.1 – Interferómetro de Fabry-Pérot .....	41
Figura 4.2 – Interferência de feixes múltiplos.....	42
Figura 4.3 – Padrões de interferência para diferentes reflectividades .....	43
Figura 4.4 – Defeitos de curvatura .....	45
Figura 4.5 – Irregularidades na superfície .....	45
Figura 4.6 – Defeitos de paralelismo .....	46
Figura 4.7 – Espectro de transmissão do interferómetro Fabry-Pérot (função de Airy) ....	48
Figura 5.1 – Esquema CAD 3D da máquina de alinhamento .....	51
Figura 5.2 – Máquina de alinhamento implementada no presente trabalho.....	51
Figura 5.3 – Imagem de uma carruagem.....	52
Figura 5.4 – Definição dos eixos .....	53
Figura 5.5 – Carruagem da Newport, modelo ILS250pp .....	53
Figura 5.6 – Carruagem de um grau de liberdade .....	53
Figura 5.7 – Imagem do pórtico.....	53
Figura 5.8 – Posicionador da Newport.....	54
Figura 5.9 – Imagem dos posicionadores com as lentes GRIN .....	54

Figura 5.10 – Câmara e lente do plano superior .....	56
Figura 5.11 - Câmara e lente do plano lateral.....	56
Figura 5.12 – Esquema CAD 3D de montagem do sistema de visão .....	56
Figura 5.13 – Imagem do sistema de visão .....	56
Figura 5.14 – Alinhamento através da máquina de visão .....	57
Figura 5.15 – Pesquisa do perfil do feixe .....	58
Figura 5.16 – Alinhamento manual .....	59
Figura 5.17 – Alinhamento manual II .....	59
Figura 5.18 - Alinhamento manual III.....	60
Figura 5.19 – Alinhamento automático .....	60
Figura 6.1 – Esquema de montagem entre duas lentes GRIN .....	62
Figura 6.2 – Esquema de montagem entre lente GRIN e um conector .....	65
Figura 6.3 – Representação do perfil do feixe para diferentes distâncias entre lentes (Thorlabs).....	73
Figura 6.4 – Variação da potência com o aumento da distância entre lentes (Thorlabs)....	73
Figura 6.5 – Variação do diâmetro do feixe vs. separação entre lentes (Thorlabs) .....	74
<b>Figura 6.6 - Perdas introduzidas pela separação entre lentes (Thorlabs), comparação com valores teóricos .....</b>	<b>75</b>
Figura 6.7 - Perdas introduzidas pelo deslocamento lateral entre lentes (Thorlabs), comparação com valores teóricos .....	75
Figura 6.8 - Representação do feixe para diferentes distâncias entre lentes (Lightpath).....	77
Figura 6.9 - Variação da potência com o aumento da distância entre lentes (Lightpath) ...	78
Figura 6.10 - Variação do diâmetro do feixe vs. separação entre lentes (Lightpath) .....	78
Figura 6.11 - Perdas introduzidas pela separação entre lentes (Lightpath), comparação com valores teóricos .....	79
Figura 6.12 - Perdas introduzidas pelo deslocamento lateral entre lentes (Lightpath), comparação com valores teóricos .....	79
Figura 6.13 - Representação do feixe para diferentes distâncias entre lentes (NSG).....	81
Figura 6.14 - Variação da potência com o aumento da distância entre lentes (NSG).....	82
Figura 6.15 - Variação do diâmetro do feixe vs. separação entre lentes (NSG) .....	82
Figura 6.16 - Perdas introduzidas pela separação entre lentes (NSG), comparação com valores teóricos .....	83
Figura 6.17 - Perdas introduzidas pelo deslocamento lateral entre lentes (NSG), comparação com valores teóricos .....	83
Figura 6.18 – Esquema de montagem entre espelho e lente GRIN .....	84
Figura 6.19 – Imagem da montagem entre espelho e lente GRIN .....	84
Figura 6.20 – Comparação do diâmetro do feixe nas várias lentes. ....	90
Figura 6.21 – Comparação da perdas de potência com o aumento da separação entre lentes para todos os modelos de lentes.....	90
Figura 6.22 – Comparação da relação $P_i$ - $P_o$ para os modelos de lentes utilizados.....	91
Figura 7.1 – Suporte desenvolvido para o conjunto espelho/GRIN.....	93
Figura 7.2 – Esquema do suporte, seção A-A, para o conjunto espelho/GRIN .....	93
Figura 7.3 – Esquema do suporte, secção B-B, para o conjunto espelho/GRIN .....	93
Figura 7.4 – Esquema de montagem e alinhamento do espelho ao suporte .....	94
Figura 7.5 – Esquema (vista lateral) de montagem e alinhamento do espelho ao suporte .	94
Figura 7.6 - Esquema (vista de topo) de montagem e alinhamento do espelho ao suporte	94
Figura 7.7 – Invólucro do tipo butterfly .....	96

## Lista de Tabelas

---

Tabela 2.1 – Componentes micro-ópticos.....	18
Tabela 2.2 – Produtos finais.....	23
Tabela 5.1 – Actuadores pneumáticos.....	52
Tabela 5.2– Especificações da máquina de visão I.....	55
Tabela 5.3 – Especificações da máquina de visão II .....	55
Tabela 6.1– Características das lentes GRIN.....	62
Tabela 6.2 – Medição do feixe entre lentes da Lightpath para diferentes distâncias entre lentes .....	63
Tabela 6.3 – Resultados da medição realizada entre GRIN (Lightpath) e conector para diferentes distâncias de separação .....	66
Tabela 6.4 – Resultados da variação dos eixos rotacionais em Z e Y .....	68
Tabela 6.5 – Medições entre lente GRIN(lightpath) e conector com um passo de 0.01mm, para diferentes distâncias de separação.....	69
Tabela 6.6 – Resultados da medição do feixe entre GRIN (Thorlabs) e conector para diferentes distâncias de separação .....	70
Tabela 6.7 – Resultados da medição do feixe entre GRIN-GRIN (Thorlabs) para diferentes distâncias de separação, após a otimização da potência. ....	71
Tabela 6.8 - Resultados da medição do feixe entre GRIN-GRIN (Lightpath) para diferentes distâncias de separação, após a otimização da potência. ....	76
Tabela 6.9 - Resultados da medição do feixe entre GRIN-GRIN (NSG) para diferentes distâncias de separação, após a otimização da potência. ....	80
Tabela 6.10 – Resultados das medições entre espelho e GRIN (NSG) para diferentes distâncias de separação.....	85
Tabela 6.11 - Resultados das medições entre espelho e GRIN (Lightpath) para diferentes distâncias de separação.....	87
Tabela 6.12 - Resultados das medições entre espelho e GRIN (Thorlabs) para diferentes distâncias de separação.....	88
Tabela 7.1 – Descrição dos componentes do sistema de montagem do conjunto espelho/GRIN .....	95
Tabela 7.2 – Sequência final de montagem de um filtro sintonizável .....	96

### 1.1 Motivação

Os dispositivos integrados de fibra óptica desempenham actualmente um papel crucial na indústria das telecomunicações. Estas aplicações são caracterizadas pela elevada exigência de desempenho dos componentes envolvidos no desenho dos sistemas, pois os elevados custos associados à perda, mesmo que temporária, da funcionalidade das infra-estruturas impõe os mais elevados padrões de operacionalidade da indústria. Este é, no entanto, um mercado de comodidade, devido à forte retracção a nível mundial e consequente oferta em excesso. Face a este novo cenário, a produção de componentes de fibra óptica para telecomunicações enfrenta hoje fortes restrições a nível do custo de fabrico sem, no entanto, sacrificar as características técnicas.

A ideia associada ao projecto proposto passa pela necessidade de desenvolvimento de ferramentas de automação para utilização na produção de dispositivos de fibra óptica integrados para a indústria das telecomunicações. Esta ferramenta será essencial para associar os elevados padrões de qualidade às exigências de redução de custos da cada vez mais generalizada nesta indústria. O processo de redução do binómio custo/desempenho permitirá desenvolver ferramentas transversais de automação que conduzam à desejada redução de custos por aumento da produtividade e não por sacrifício da qualidade. Este tipo de ferramenta de automação encerra assim um grande valor acrescentado devido à dimensão actual do mercado das telecomunicações baseado na tecnologia de fibras ópticas. Por outro lado, a tendência recente para a instalação generalizada de serviços de comunicações por fibra óptica até ao utilizador – i.e., fiber to the home (FTTH) – vai corresponder a um forte aumento na procura de componentes de fibra óptica, o que abre novas perspectivas para a adopção deste tipo de ferramenta.

### 1.2 Estrutura da tese

A tese encontra-se dividida em 7 capítulos, a sua descrição é a seguinte:

- Capítulo I – Neste capítulo é dada a conhecer a motivação da tese, bem como a descrição da sua estrutura.
- Capítulo II – Com este capítulo pretende-se dar a conhecer o estado da indústria na área da montagem e alinhamento de componentes micro-ópticos, métodos e meios de fixação e alguns dos seus produtos finais.

- Capítulo III – A descrição teórica do comportamento de lentes GRIN é realizada neste capítulo.
- Capítulo IV – Este capítulo descreve o funcionamento de um interferómetro de Fabry-Pérot.
- Capítulo V – Aqui é realizada a descrição dos segmentos que compõem a máquina de alinhamento, a plataforma mecânica, a máquina de visão e o software de controlo.
- Capítulo VI – Neste capítulo são mostrados os ensaios realizados com diferentes modelos de lentes GRIN.
- Capítulo VII – Neste capítulo apresentam-se as conclusões, optimizações do sistema e trabalho futuro.

### 2.1 Indústria

O desenvolvimento em grande escala da fibra óptica nas telecomunicações, como por exemplo, a chegada de fibra até nossa casa, *FTTH*, necessita do desenvolvimento de dispositivos de dimensões reduzidas e baixo custo, mas também com capacidade multi-canais ópticos e integração de módulos optoelectrónicos [1, 2]. O dinamismo do mercado está a provocar uma pressão acrescida para o aumento da produção de componentes micro-ópticos e conseqüente diminuição do seu custo. A produção automática é uma via para que esta mudança seja mais célere. A automação de processos consegue gerar um aumento significativo da produção, reduzindo os custos da produção e sem condicionar a qualidade.

Por outro lado, o desenvolvimento da automação para um produto exige um investimento elevado, pois envolve o desenho ou o redesenho de dispositivos, a integração de novos equipamentos e de processos, o desenvolvimento de bancadas de trabalho e estratégias de venda e de gestão de stocks. Então, torna-se muito importante identificar, quais os processos de produção mais correctos de modo a maximizar os benefícios destes processos e conseguir sustentar os elevados custos do investimento [3].

Ao contrário de indústrias mais maduras, tais como, a dos semicondutores, muitos métodos de montagem de aplicações com fibra óptica não são hoje em dia compatíveis com sistemas automáticos de produção. Por exemplo, no domínio eléctrico, uma boa ligação entre dois componentes ocorre quando estes se tocam fisicamente e a solda flúi entre esse contacto. Contudo, no domínio óptico, não só é necessária uma boa ligação, mas também é requerida uma orientação exacta do alinhamento. O controlo da temperatura é mais importante e mais restrito, porque muitos componentes ópticos são sensíveis à temperatura, podendo, por exemplo, o comprimento de onda de funcionamento ser alterado. Como resultado destes constrangimentos, o custo do packaging varia actualmente entre 60% e 80% do custo total do componente [4].

Existem três factores que limitam o desenvolvimento em larga escala da automação de processos de fabricação de componentes micro-ópticos[3, 5]:

- A falta de standards ao nível do packaging – não existem especificações definidas, desde o desenho, tipos de materiais e dimensões

- Tolerâncias da montagem e requisitos ambientais – ao contrário da electrónica, as conexões na fotónica necessitam que a precisão de alinhamento seja muito elevada. O packaging deve conseguir aguentar ciclos de temperatura e que os testes ambientais sejam qualificados para aplicações terrestres e submarinas.
- A inexistência de uma cadeia de fornecimento – ainda não se estabeleceram empresas que forneçam componentes que são críticos para a micro-óptica e packaging, bem como, equipamentos e ferramentas automáticas.

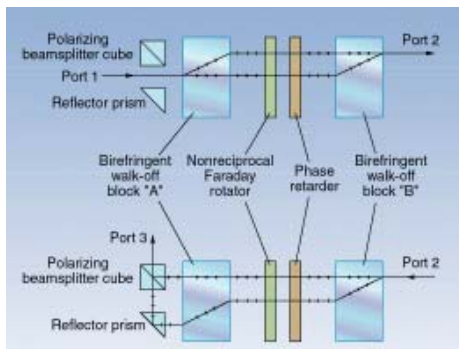
A correlação destes factores é uma limitação à adopção de novas ferramentas de automação, equipamento e de novos processos na indústria de componentes ópticos integrados de fibra óptica.

As questões que definem os parâmetros convencionados, standard, e o desenvolvimento das cadeias de fornecimento irão demorar alguns anos a serem implementadas. Infelizmente, ainda não existe uma organização formal de standards ou consórcio, de modo a unir os esforços que a indústria tem realizado, no mesmo sentido que a *International SEMATECH and Semiconductor Equipment and Materials International* (SEMI) conseguiu na indústria dos semicondutores. Estas organizações, desenvolvem para os fabricantes de automação industrial, processos, standards de packaging e de construção [1, 3, 6]. Os grandes fabricantes de sistemas de comunicações por fibra óptica, bem como, os maiores fornecedores de componentes micro-ópticos devem unir esforços com o objectivo de estabelecer standards. Este processo será futuramente alargado a todos os dispositivos que se baseiem em novas tecnologias.

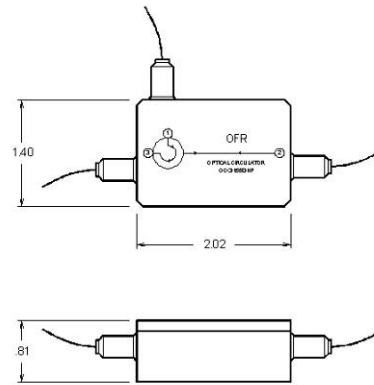
Uma questão muito importante é o momento da introdução da automação, e até que nível esta será rentável. Cada aplicação deverá ser correctamente avaliada antes de se iniciar um projecto [7, 8].

Um candidato excelente para a automação é a montagem de componentes micro-ópticos de precisão. Neste caso, o resultado da montagem por mão humana não permite obter resultados consistentes. A maioria dos componentes é de dimensão inferior ao milímetro, ver Figura 2.1 e Figura 2.2, e requerem que as tolerâncias de alinhamento e de ligação seja inferior a 150 nm durante o processo de montagem [9-13].



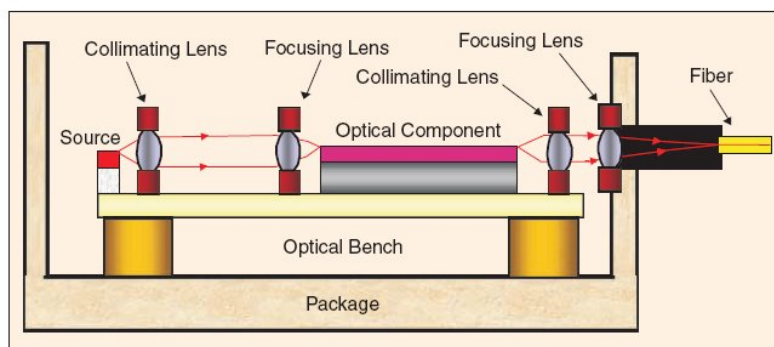


**Figura 2.1** – Esquema de um circulador[14]



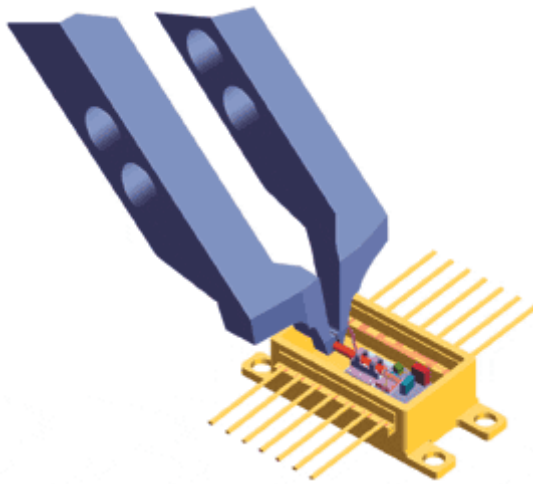
**Figura 2.2** – Esquema técnico de um circulador (dimensões em cm)[15]

Por exemplo, um detector que seja usado num sistema a 10 Gbps poderá ter uma zona activa de na gama dos 25  $\mu\text{m}$ . O transmissor, tipicamente um laser *DFB*, terá as tolerâncias de alinhamento ainda mais restritas na ordem dos 10  $\mu\text{m}$ , e possui uma forma modal que tem de igualar o modo da fibra. Estes requisitos necessitam na maioria dos casos de componentes ópticos adicionais – e.g., lentes, isoladores – entre o chip laser semiconductor e a fibra óptica (ver Figura 2.3). Cada componente adicional complica o processo de alinhamento e aumenta as perdas de inserção. Estas interfaces podem ser uma fonte de atenuação e ter um forte impacto no custo do dispositivo final.



**Figura 2.3** – Integração optoelectrónica com alinhamento de diversos componentes ópticos[9]

Consequentemente, torna-se imperativo o desenvolvimento quer de equipamento robótico com resolução inferior ao micrómetro, ver Figura 2.4, quer de micro ferramentas que permitam a minimização do desalinhamento provocado pelos desvios ocorridos durante a ligação entre componentes.



**Figura 2.4** – Simulação de uma ferramenta automática para colocação de componentes[3]

De um ponto de vista de melhoramento de produção e redução de custos, é muito importante eliminar falhas associadas a tarefas semi-automáticas ou mesmo manuais. Deve considerar-se a utilização de equipamento robótico, porque reduz o erro humano e diminui as taxas de danos provocados fisicamente e/ou por descargas electrostáticas. É comum em muitos processos de fabricação que existam múltiplos passos nos quais o manuseamento humano é utilizado durante o ciclo de montagem. É do conhecimento geral no meio industrial que este facto contribui para o factor de quebra durante a montagem, *PIF* (Packaging Induced Failure) [1, 2, 8, 12, 16].

Actualmente, a investigação e o desenvolvimento de processos de alinhamento de componentes micro-ópticos é realizada em instituições académicas. Embora algumas empresas, líderes em automação e na produção de componentes ópticos, se tenham já apercebido da importância deste tipo de sistemas. As empresas *Newport*, *Kyocera*, *Polytech PI* e a *Palomar* já iniciaram os seus próprios processos de investigação e desenvolvimento de novos produtos [4].

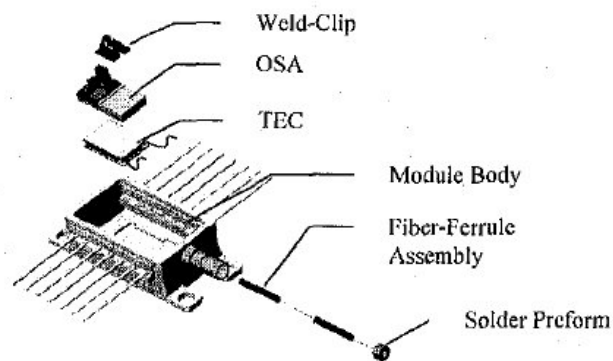
Esta técnica baseia-se na combinação de inspeção visual e alinhamentos de maximização de potência.

Já existem alguns equipamentos disponíveis que permitem satisfazer as necessidades específicas dos componentes de fibra óptica. Actualmente, as ferramentas existentes que permitem a automação de processos são[3]:

- Teste e caracterização de dispositivos em fase de pré-montagem – tais como, análise de defeito de filmes finos, caracterização de guias de onda planares.
- Packaging e montagem de precisão – preparação da fibra, limpeza e clivagem, montagem de colimadores e alinhamento dos pigtails.
- Teste final – caracterização do rendimento e testes ambientais.

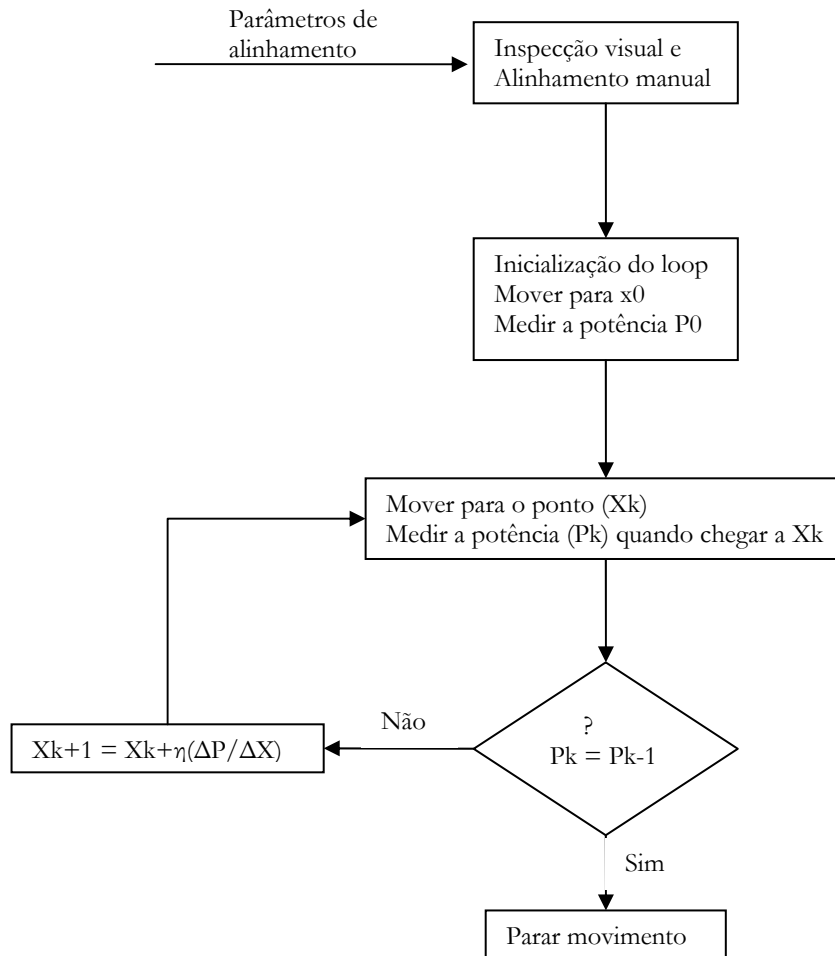
A *Newport* já disponibiliza comercialmente alguns sistemas desenvolvidos, mas na área da colocação de fibra óptica e soldadura a laser.

Com o propósito de servir como exemplo de montagem, seguidamente analisar-se-á o caso dos díodos de bombagem a 980nm (ver Figura 2.5). A montagem deste dispositivo apresenta vários desafios, particularmente no manuseamento, alinhamento e conexão de fibra óptica e no manuseamento após a montagem.



**Figura 2.5** – Montagem do diodo laser de 980 nm[12]

O loop de controlo típico implementado nos processos de alinhamento deste tipo de dispositivo pode ser observado na Figura 2.6.



**Figura 2.6** – Loop de controlo usado para o alinhamento de componentes micro-ópticos

A tolerância do alinhamento é da ordem dos  $\pm 0.15 \mu\text{m}$  no eixo vertical e  $\pm 3.0 \mu\text{m}$  no eixo horizontal, o que representa cerca de 5% (0.25 dB) de perdas a partir do ponto de alinhamento onde o acoplamento de luz é máximo. Na condição de alinhamento óptimo a distância entre o chip LD e a fibra varia entre os  $5 \mu\text{m}$  e os  $8 \mu\text{m}$ . Podemos então imaginar os desafios que envolvem a colocação e o posicionamento de componentes que exigem tão elevada precisão.

Tipicamente todos os componentes são colocados manualmente dentro do módulo, apenas o processo de colocação dos pigtaills é realizada automaticamente. O uso deste método convencional conduz a períodos de montagem que duram entre 15 a 30 minutos, dependendo apenas, dos vários processos de validação dos passos dados durante a montagem. O ciclo total inclui: posicionamento relativo dos componentes, pré alinhamento e caracterização, optimização do alinhamento, pré-soldadura a laser e caracterização,

processo de soldadura a laser (inclui laser hammering e/ou ajustes mecânicos automáticos caso necessários), caracterização da soldadura e por fim o package é selado hermeticamente. Contudo, com as ajudas dos avanços das tecnologias de montagem, tais como, pré-alinhamento assistido pela máquina de visão [5], e os processos de alinhamento e de ligação só por si podem ter uma duração inferior a 3 minutos. Assim sendo, o tempo consumido durante o manuseamento dos componentes e outros periféricos durante o processo de montagem é enorme, ocupando assim tempo precioso de fabricação, limitando a produção e aumentando o custo.

O desenvolvimento de equipamento robótico, para uma produção mais eficiente de componentes em fibra óptica para as telecomunicações incorpora assim um grande valor, uma vez que, reduz substancialmente a quantidade de processos críticos realizados por recursos humanos especializados, diminui o factor *PIF*, e reduz o custo do produto.

## 2.2 Componentes micro-ópticos

A micro-óptica possibilita a captação, distribuição ou modificação da luz, e é um método novo para alterar e influenciar a luz com componentes e estruturas de dimensões bastante reduzidas. Até meio dos anos 90, o desenvolvimento da micro-óptica ocorria principalmente para aplicações militares que requeriam componentes de tamanho e peso reduzido. Grandes avanços no desenho e na tecnologia de fabricação de componentes micro-ópticos está a facilitar a evolução da miniaturização. Esta evolução, bem como, a necessidade da redução de custos está a dar impulso a que a óptica tradicional esteja a ser substituída por elementos ópticos mais pequenos e mais baratos. Os elementos micro-ópticos difractivos e refractivos complementam e algumas vezes excedem mesmo as funcionalidades e o rendimento da óptica tradicional. O material dos componentes é um factor importante, actualmente estes componentes são de quartzo, vidro e plástico [11, 13].

A micro-óptica é uma tecnologia chave, e importante para se poder alcançar as necessidades da miniaturização, a redução de custo e o melhoramento da fiabilidade. Hoje já existem processos de fabricação de elevado volume com grande rentabilidade económica.

A utilização destes componentes é feita nos seguintes ramos:

- Comunicações
- Automóvel
- Aeroespacial

Alguns dos componentes micro-ópticos são:

**Tabela 2.1** – Componentes micro-ópticos

<ul style="list-style-type: none"><li>• Lentes</li></ul>	
<ul style="list-style-type: none"><li>• Lentes GRIN</li></ul>	
<ul style="list-style-type: none"><li>• Lentes esféricas</li></ul>	
<ul style="list-style-type: none"><li>• Primas</li></ul>	
<ul style="list-style-type: none"><li>• Divisores de feixe</li></ul>	
<ul style="list-style-type: none"><li>• Polarizadores</li></ul>	

As dimensões destes componentes são normalmente de poucos milímetros, podendo ter menos de um milímetro de espessura, tornando-os ideais para aplicações nas quais a dimensão do produto final seja um parâmetro crucial.

### 2.3 Métodos e meios de fixação

Devido às reduzidas tolerâncias envolvidas nos processos de alinhamento, ainda não é possível produzir dispositivos com recurso a processos simples de alinhamento mecânico. Normalmente são usados processos de alinhamento activos, em que, o próprio dispositivo ao ser montado se encontra activo ou um equipamento auxiliar permite o alinhamento por maximização da potência óptica enquanto é realizado o acoplamento à fibra óptica. Este

requisito aumenta a complexidade e custo do equipamento usado, mas também, influencia a escolha da tecnologia a usar para fixar os componentes [11, 13].

O ponto fulcral na fixação dos componentes micro-ópticos é a fiabilidade ao longo prazo. Os métodos usados para este efeito baseiam-se no uso de adesivos com cura térmica e/ou ultravioleta, soldadura ou soldadura a laser [11, 13]. A escolha do método a usar depende de vários factores, tais como:

- Fiabilidade
- Estabilidade da temperatura durante os processos de fabrico
- Tipos de materiais usados
- Limites impostos pelo alinhamento activo
- Limites impostos pela montagem automática

O tipo de tecnologia usada para a fixação, determina o modo como a fibra óptica deverá ser preparada. Por exemplo, o uso de adesivos apenas necessita que seja retirado o revestimento à fibra, enquanto na soldadura esta deverá ser revestida metalicamente, (ver Figura 2.7), por outro lado no caso de soldadura a laser a fibra está inserida num tubo metálico.



**Figura 2.7** – Fibra óptica com revestimento metálico[17]

Para garantir um processo de fixação estável é necessário considerar o ciclo de montagem completo, por exemplo, o material deverá ser escolhido considerando a estabilidade a tensões mecânicas. É também importante que o dispositivo seja o mais pequeno possível para limitar a expansão térmica, podendo dar origem a uma fraca estabilidade do acoplamento da fibra.

### 2.3.1 Adesivos

Este método tem sido usado durante muitos anos, uma vez que existe uma grande variedade (ver Figura 2.9) são de fácil utilização, (ver Figura 2.8), mas principalmente devido à falta de alternativas. Com este tipo de fixação, a principal limitação é a estabilidade a altas temperaturas. As temperaturas a que o adesivo pode ser sujeito, após a realização da cura, sem que o alinhamento seja alterado, pode limitar todo o processo de montagem [11].

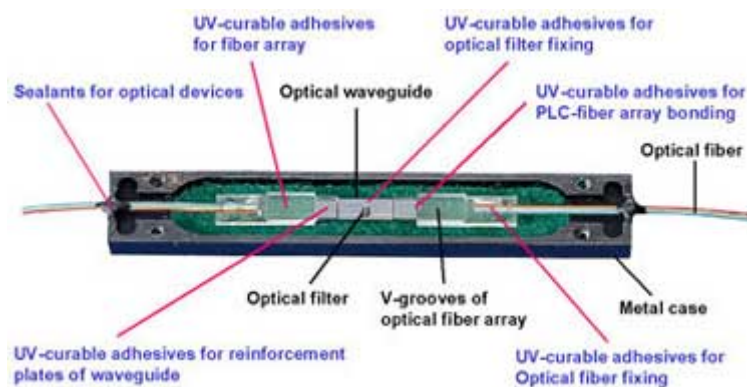


Figura 2.8 – Colagem com adesivo



Figura 2.9 – Diferentes tipos de adesivos



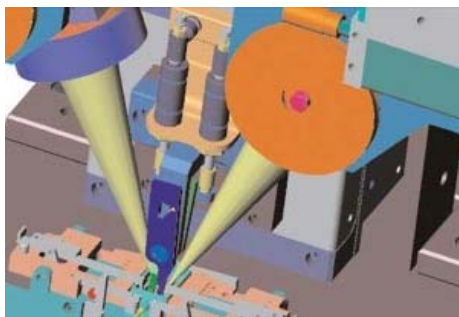
### 2.3.2 Soldadura

A utilização deste método, implica que a fibra seja metalizada com um material adequado para o efeito, sendo o Cr-Cu-Au (Crómio-Cobre-Ouro) a composição mais comum. Existem vários tipos de solda para fixação de componentes micro-ópticos, tais como Au-Sn (Ouro-Estanho) e Au-Ge (Ouro-Germânio) utilizadas em altas temperaturas e Sn-Pb (Estanho-Chumbo), Pb-In (Chumbo-Índio) e Sn-Ag (Estanho-Prata) para baixas temperaturas. Quanto maior for a temperatura de soldadura maior será a gama de temperaturas disponíveis no processo de montagem. A maior desvantagem na utilização de soldas para altas temperaturas é a possibilidade de existirem tensões no local onde é feita a soldadura. Em oposição as soldas utilizadas em baixa temperatura, são mais susceptíveis à fadiga térmica.

Durante um alinhamento activo, deve ser possível por a funcionar o dispositivo de um modo satisfatório, por exemplo, no caso de um laser semiconductor a operação laser nestas condições não é possível. Para este exemplo já existem técnicas que superam o problema, não existindo nenhuma implicação com as altas temperaturas [11].

### 2.3.3 Soldadura a laser

Nesta técnica, a fibra é selada num suporte metálico, que seguidamente é soldado por impulsos de luz, normalmente através de um laser de Nd:YAG de alta potência ( ver Figura 2.10 e Figura 2.11). Tipicamente, este tipo de laser, atinge uma energia de poucos joules com um feixe de 300  $\mu\text{m}$  de diâmetro.



**Figura 2.10** – Simulação de uma máquina de soldadura a laser[18]



**Figura 2.11** – Laser de soldadura

Uma vez que, a soldadura é realizada a altas temperaturas, é diminuído o problema da soldadura se partir visto no método descrito anteriormente. Contudo, podem ocorrer deslizamentos devido à forma como os pontos de soldadura solidificam. Consequentemente pode ser necessário o recurso a mecanismos que consigam um ajuste fino do alinhamento. Por exemplo, durante o arrefecimento da soldadura a fibra é puxada para baixo, isto é, a altura da base da fibra relativamente à base do dispositivo diminui, de modo que é importante que seja possível reajustar essa altura. Com a escolha correcta dos parâmetros de soldadura consegue-se que a tolerância a este efeito seja da ordem dos  $\pm 2 \mu\text{m}$  [11].

O desenho de peças para a soldadura a laser é crucial, bem como, a compatibilidade de materiais. Nem todos os materiais usados no invólucro exterior, como o *Kovar* (liga metálica de Níquel-Cobalto), pode ser soldado adequadamente sem que possa ocorrer a formação de fendas nas junções onde é realizada a soldadura. O aço inoxidável também é utilizado, mas não podem ser banhados a ouro, uma vez que, o ouro também pode provocar fendas. Todos os parâmetros da soldadura a laser, a potência, a forma e a duração do impulso e a largura do feixe devem ser cuidadosamente escolhidos, para se garantir a reprodutibilidade da qualidade da soldadura.

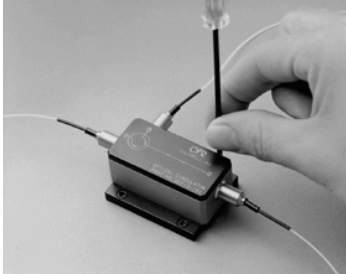
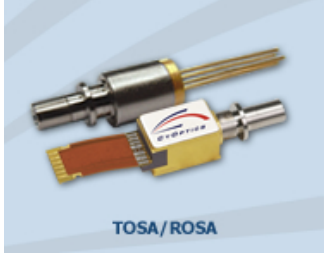




Uma vez que o calor gerado através da soldadura é localizado, praticamente não existe aquecimento dos substratos. Permitindo assim que o alinhamento activo seja feito utilizando dispositivos que operem em gamas de temperatura normais [11].

A compatibilidade com técnicas de montagem hermética, e a possibilidade da introdução da automação de processos são um ponto a favor da soldadura a laser, tornando-a indicada para a produção em larga escala. Este método está a ser largamente usado pela indústria como tecnologia de ponta, mas a grande desvantagem é o elevado custo inicial do equipamento[11].

## 2.4 Dispositivos finais

No mercado existem bastantes dispositivos que são fabricados através dos métodos descritos anteriormente., como por exemplo:

Tabela 2.2 – Produtos finais

<ul style="list-style-type: none"><li>• Circuladores ópticos</li></ul>	
<ul style="list-style-type: none"><li>• TOSA/ROSA</li></ul>	
<ul style="list-style-type: none"><li>• Filtros Fabry-Pérot</li></ul>	
<ul style="list-style-type: none"><li>• Fontes laser</li></ul>	
<ul style="list-style-type: none"><li>• Espelhos de rotação de Faraday</li></ul>	
<ul style="list-style-type: none"><li>• Acoplador óptico</li></ul>	

A Tabela 2.2 mostra dispositivos ópticos de reduzidas dimensões que obrigam à utilização de métodos de alinhamento e componentes micro-ópticos. O desenho do dispositivo e a planificação do respectivo processo de construção têm necessariamente de ser desenvolvidos com o propósito de alcançar um custo de fabricação que seja competitivo no mercado actual. Além disso qualquer instabilidade a nível sub-micrométrico dos componentes internos provoca grandes perdas nos sistemas de comunicações que integram em cadeia estes dispositivos. Desse modo é necessário garantir que sobrevivem a exigentes testes de controlo, verificando assim a dependência do seu desempenho face às mais extremas condições ambientais.

## **2.5 Observações**

Com o rápido desenvolvimento da tecnologia é difícil prever com exactidão o futuro das comunicações ópticas, mas pode-se afirmar que a evolução está a convergir para o crescimento contínuo da capacidade dos sistemas em fibra óptica, o aumento do nível de integração nos componentes ópticos e optoelectrónicos, e no desenvolvimento de técnicas de produção que permitam reduzir o custo em escala dos componentes. O desenvolvimento destas técnicas terá um grande impacto nos componentes micro-ópticos futuros e na implementação de dispositivos neles baseados.

### 3.1 Introdução

As perdas por acoplamento são um parâmetro importante no desenvolvimento de óptica integrada, componentes de fibra óptica e subsistemas que envolvem a propagação de luz em espaço livre, tais como, isoladores, circuladores, atenuadores, comutadores, e multiplexadores e demultiplexadores usados em sistemas de multiplexagem por comprimento de onda, *WDM* (Wavelength Division Multiplexing). A necessidade de manter as perdas por acoplamento baixas implica que a distância de propagação em espaço livre seja limitada, pois estas perdas são criticamente dependentes da distância entre as duas fibras ópticas e do seu alinhamento relativo. Por exemplo, num acoplamento fibra com fibra, uma distância de separação que seja superior ao diâmetro do núcleo resulta em perdas de aproximadamente de 1 dB. Deste modo a implementação de destes componentes obrigada na maioria das situações ao recurso a fibras monomodo acopladas a lentes colimadoras. Com lentes colimadoras as fibras podem ter uma separação superior mil vezes ao tamanho do núcleo e, mesmo assim, conseguir perdas inferiores.

### 3.2 Lentes GRIN

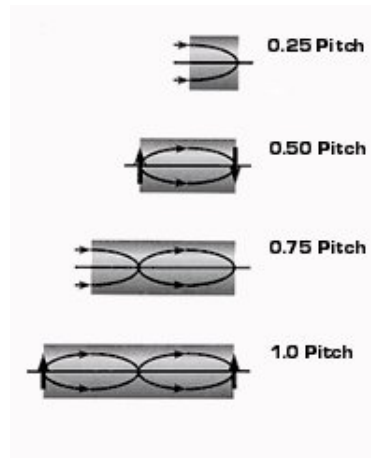
#### 3.2.1 Propagação da luz em lentes GRIN

O que determina o modo como uma lente homogénea normal reconfigura uma frente de onda é a diferença entre o seu índice de refração e o do meio, e a curvatura das suas superfícies. Este mesmo efeito pode ser obtido variando o índice de refração ao longo da secção transversal da lente. Em determinadas secções, onde o índice de refração é maior, pelo que a propagação da luz se torna mais lenta, sendo que o oposto se verifica quando o índice é menor. O nome destas lentes surge do seu **GR**adiante do **ÍN**dice de refração, lentes GRIN.

As lentes GRIN podem ser especificadas pelo seu comprimento ou através de submúltiplos do valor correspondente a um período oscilação, *pitch*, por exemplo, uma lente com *pitch* de 1 tem um comprimento igual a um período completo de oscilação dos raios, ver Figura 3.1 [19, 20]:

$$L = 2\pi/\sqrt{A}, \quad 3.1$$

se o seu *pitch* for de 0.25 então terá um comprimento igual a  $\frac{1}{4}$  do período de oscilação  $\left(\frac{\pi}{2\sqrt{A}}\right)$ .

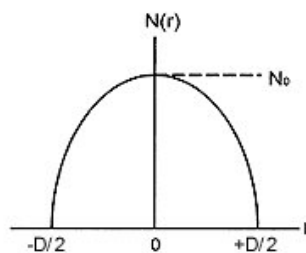


**Figura 3.1** – Diferentes tipos de lentes GRIN[21]

Uma lente GRIN possui uma variação radial do índice de refração, com uma forma parabólica. A expressão que regula esta variação é a seguinte:

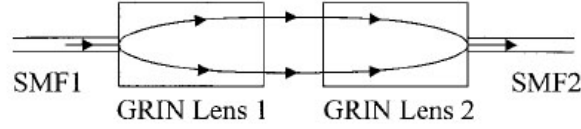
$$n_r = n_0 \left( 1 - \frac{Ar^2}{2} \right) \quad 3.2$$

onde  $n_0$  é o índice de refração no centro da lente,  $\sqrt{A}$  é a constante de gradiente e  $r$  é a distância ao eixo central [19, 20].



**Figura 3.2** – Variação do índice de refração de uma lente GRIN[21]

A Figura 3.3 mostra um sistema de acoplamento utilizando lentes GRIN, no qual a lente 1 é considerada a lente transmissora, enquanto a lente 2 é a receptora.



**Figura 3.3** – Sistema de acoplamento de luz utilizando duas lentes GRIN[22]

No caso de uma fibra monomodo, o modo fundamental transmitido pode ser aproximado a um feixe gaussiano. Uma lente GRIN com um *pitch* de  $1/4$  ao ser acoplada a uma fibra monomodo transmite um feixe aproximadamente gaussiano, com a cintura localizada na face da lente.

A descrição do modo fundamental pode ser efectuada através do raio do feixe gaussiano  $w_i$  e dos raios de curvatura das superfícies com a mesma fase  $R_i$ . O parâmetro complexo de curvatura,  $q_i$ , é obtido do seguinte modo [19, 22-24]:

$$\frac{1}{q_i} = \frac{1}{R_i} - j \frac{\lambda}{\pi \cdot n \cdot w_i^2} \quad 3.3$$

onde,  $\lambda$  é o comprimento de onda,  $n$  é o índice de refração do meio entre as lentes GRIN.

A descrição da transmissão através de uma lente GRIN pode ser efectuada na seguinte forma matricial seguinte:

$$\begin{bmatrix} \cos(\sqrt{AZ}) & \frac{1}{n_0 \sqrt{A}} \sin(\sqrt{AZ}) \\ -n_0 \sqrt{A} \sin(\sqrt{AZ}) & \cos(\sqrt{AZ}) \end{bmatrix} \quad 3.4$$

onde,  $Z$  é o comprimento da lente GRIN.

Uma vez que as lentes utilizadas têm, na maioria dos casos, um *pitch* de  $1/4$ , e sabendo que o *pitch*,  $p$ , é:

$$p = \frac{\sqrt{AZ}}{2\pi} \quad 3.5$$

concluímos que nestas condições

$$p = \frac{\pi}{2}$$

Deste modo a matriz para uma lente GRIN com um *pitch* de  $\frac{1}{4}$  é:

$$G = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{n_0 \sqrt{A}} \\ -n_0 \sqrt{A} & 0 \end{bmatrix} \quad 3.6$$

A distância de propagação em espaço livre,  $Z_0$ , correspondente à separação que existe entre as lentes é descrita pela seguinte matriz:

$$S = \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z_0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad 3.7$$

Sabendo que um feixe gaussiano se propaga segundo a lei *ABCD*, logo:

$$q_{i+1} = \frac{A_i q_i + B_i}{C_i q_i + D_i} \quad 3.8$$

Se considerarmos que o campo óptico do feixe gaussiano transmitido pela fibra monomodo 1 contém um campo modal com o diâmetro  $w_0$  e com  $R_0 = \infty$ , através da utilização das equações 3.3, 3.6, 3.7 e 3.8 obtemos:

$$w_1 = \frac{\lambda}{\pi \cdot n \cdot w_0 \cdot n_0 \cdot \sqrt{A}} \quad 3.9$$

$$R_1 = \infty$$



$$w_2 = w_1 \left[ 1 + \left( \frac{\lambda \cdot Z_0}{\pi \cdot n \cdot w_1^2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad 3.10$$

$$R_2 = Z_0 \left[ 1 + \left( \frac{\pi \cdot n \cdot w_1^2}{\lambda \cdot Z_0} \right)^2 \right] \quad 3.11$$

$$w_3 = \frac{\lambda}{\pi \cdot n \cdot w_1 \cdot n_0 \cdot \sqrt{A}} = w_0 \quad 3.12$$

$$R_3 = -\frac{1}{(n_0 \sqrt{A})^2 Z_0} \quad 3.13$$

O raio de luz que a lente GRIN 1 transmite é um feixe gaussiano em que a sua cintura se encontra na face da lente. A lente GRIN 2 capta um feixe com diâmetro expandido  $w_2$  e raio de curvatura  $R_2$ . Na saída da segunda lente  $w_3$  é igual a  $w_0$ , isto significa que o diâmetro do feixe tem o mesmo raio modal do modo fundamental da fibra monomodo. As perdas por acoplamento resultam então da diferença entre os raios de curvatura. Um feixe de luz, perfeitamente alinhado, quando é acoplado para uma fibra deve ter um diâmetro de  $w_0$  com um raio  $R=\infty$ , contudo o feixe à saída da GRIN 2 possui um diâmetro  $w_0$  com um raio de curvatura dado por

$$R = \frac{-1}{(n_0 \sqrt{A})^2 Z_0} \quad 3.14$$

Quando  $Z_0$  aumenta, o  $|R|$  diminui, portanto, a necessidade de um acoplamento óptimo requer uma fibra com uma abertura numérica maior.

### 3.2.2 Cálculo das perdas por acoplamento

Considerando a Figura 3.4

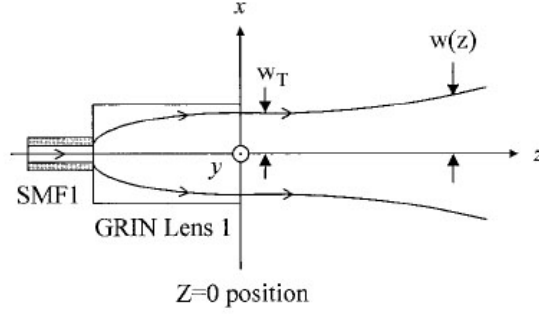


Figura 3.4 – Distribuição do feixe à saída da lente GRIN[22]

a componente  $E_x$  do feixe gaussiano pode ser expressa do seguinte modo [22-24]:

$$E_x(x, y, z) = E_1 \frac{w_T}{w(z)} \exp \left\{ -i[kz - \eta(z)] - r^2 \left[ \frac{1}{w^2(z)} + i \frac{k}{2R(z)} \right] \right\} \quad 3.15$$

onde  $E_1$  é a amplitude do campo em  $(x=0, y=0, z=0)$ ,  $r$  é o raio na posição  $(x, y, z)$  ao longo do eixo  $z$ , e:

$$k = \frac{2\pi n}{\lambda} \quad 3.16$$

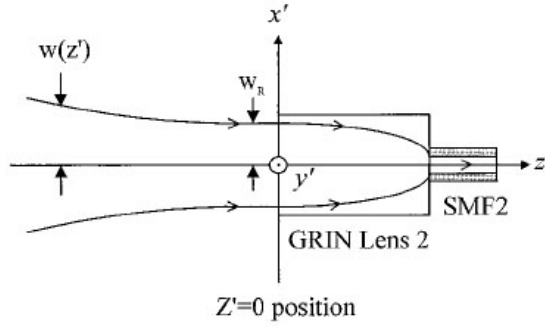
$$\eta(z) = \tan^{-1} \left( \frac{\lambda \cdot z}{\pi \cdot n \cdot w_T^2} \right) \quad 3.17$$

$$w^2(z) = w_T^2 \left[ 1 + \left( \frac{\lambda \cdot z}{\pi \cdot n \cdot w_T^2} \right)^2 \right] \quad 3.18$$

$$R(z) = z \left[ 1 + \left( \frac{\pi \cdot n \cdot w_T^2}{\lambda \cdot z} \right)^2 \right] \quad 3.19$$

A equação 3.15, representa a solução fundamental para um feixe gaussiano. O parâmetro  $w(z)$ , conhecido como o diâmetro do feixe, representa a largura para a qual a amplitude do campo é  $1/e$  menor quando comparada com o seu valor no eixo. A posição  $z=0$  corresponde à dimensão mínima do diâmetro do feixe. Enquanto que  $R(z)$  indica o raio de curvatura em  $z$ , sendo a fase da onda dada por  $\eta(z)$  [19, 24].

Na análise das perdas por acoplamento são consideradas duas lentes colimadoras, sendo as perdas devidas ao desalinhamento entre ambas. Como o feixe de luz percorre um espaço aberto e a lente receptora antes de chegar à fibra, apenas uma parte do feixe, que seja equivalente ao modo fundamental da fibra monomodo 2, é acoplado, ver Figura 3.5.



**Figura 3.5** – Distribuição do feixe que pode ser acoplado na fibra através da lente GRIN[22]

Então omitindo o factor  $\exp(imt)$  da equação 3.15, podemos obter a seguinte equação :

$$E_{x'}(x', y', z') = E_1 \frac{w_T}{w(z')} \exp \left\{ -i \left[ kz' - \eta(z') \right] - r^2 \left[ \frac{1}{w^2(z')} + i \frac{k}{2R(z')} \right] \right\} \quad 3.20$$

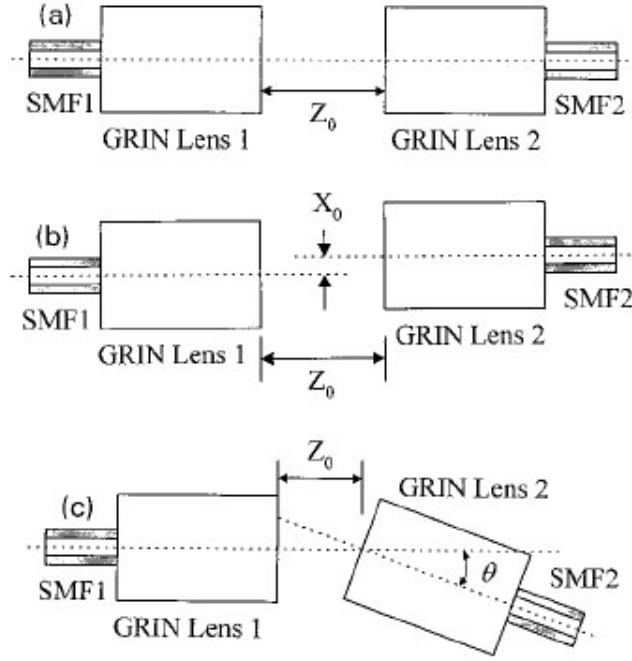
onde  $r$  é o raio da posição  $(x', y', z')$  ao eixo  $z'$ , e:

$$\eta(z') = \tan^{-1} \left( \frac{\lambda \cdot z'}{\pi \cdot n \cdot w_R^2} \right) \quad 3.21$$

$$w^2(z') = w_R^2 \left[ 1 + \left( \frac{\lambda \cdot z'}{\pi \cdot n \cdot w_R^2} \right)^2 \right] \quad 3.22$$

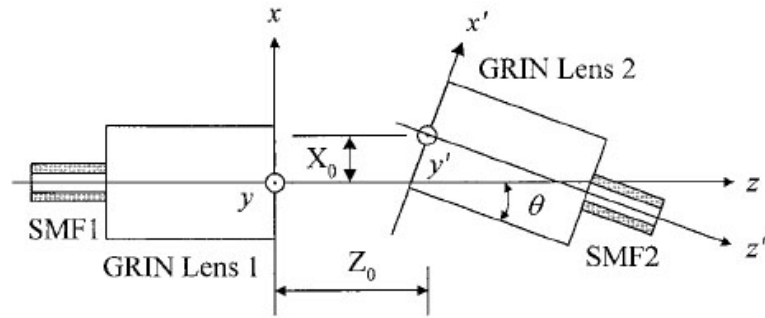
$$R(z') = z' \left[ 1 + \left( \frac{\pi \cdot n \cdot w_R^2}{\lambda \cdot z'} \right)^2 \right] \quad 3.23$$

Os valores  $E_1$  e  $w_T$  na equação 3.20 devem-se à conservação da energia durante o acoplamento. As perdas por acoplamento entre duas lentes colimadoras podem ser calculadas através do coeficiente de acoplamento entre os dois feixes gaussianos [22]. As perdas são dominadas pela separação Figura 3.6 a), pelo deslocamento lateral, Figura 3.6 b) e pelo desvio angular, Figura 3.6 c) entre os dois feixes gaussianos.



**Figura 3.6** – Tipos de desalinhamento: a) separação entre lentes; b) deslocamento lateral; c) desvio angular[22]

A Figura 3.7 mostra duas lentes GRIN com os três tipos de erro de alinhamento.



**Figura 3.7** – Imagem com os três tipos de desalinhamento[22]

O coeficiente de acoplamento em  $z'=0$  é obtido da seguinte forma:

$$\eta_c = \frac{2}{\pi \cdot E_1^2 \cdot w_T^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E_x(x, y, z)|_{z=0} \times E_x^*(x', y', z')|_{z'=0} dx' dy' \quad 3.24$$

Quando o alinhamento é perfeito, o factor  $2/(\pi \cdot E_1^2 \cdot w_T^2)$  presente na equação anterior mantém  $\eta_c = 1$ , para efeitos de conservação da energia. Embora até este ponto se

tenha usado a componente  $E_x$ , as equações até agora demonstradas também são válidas para  $E_y$ .

Pela Figura 3.7 pode-se retirar as coordenadas do sistema, temos então:

$$x = x' \cos \theta - z' \sin \theta + X_0 \quad 3.25$$

$$z = x' \sin \theta + z' \cos \theta + Z_0 \quad 3.26$$

$$y = y' \quad 3.27$$

$$r^2 = x^2 + y^2 = (x' \cos \theta - z' \sin \theta + X_0)^2 + y'^2 \quad 3.28$$

Tipicamente o valor de  $\theta \leq 0.3^\circ$ , pode-se então assumir que  $\cos \theta \approx 1$ , substituindo então  $z$  por  $Z_0$  em  $w(z)$ ,  $R(z)$  e  $\eta(z)$  [22]. Se inserirmos estes valores na equação 3.15, para  $z'=0$ , a equação 3.15 pode ser escrita da seguinte forma:

$$\begin{aligned} E_x(x, y, z)|_{z'=0} &= E_x(x'+X_0, y', x' \sin \theta + Z_0) = \\ &= E_1 \frac{w_T}{w(Z_0)} \exp\{-i[kZ_0 - \eta(Z_0)]\} \times \\ &\times \exp\left\{-\left[\left[\frac{1}{w^2(Z_0)} + i\frac{k}{2R(Z_0)}\right]x'^2 + \left[\left[\frac{1}{w^2(Z_0)} + i\frac{k}{2R(Z_0)}\right] \times 2X_0 + ik \sin \theta\right]x' + \right. \right. \\ &\left. \left. + \left[\frac{1}{w^2(Z_0)} + i\frac{k}{2R(Z_0)}\right]X_0^2\right]\right\} \times \exp\left\{-\left[\frac{1}{w^2(Z_0)} + i\frac{k}{2R(Z_0)}\right]y'^2\right\} \end{aligned} \quad 3.29$$

Na equação 3.20 ao substituirmos  $r^2$  por  $x'^2 + y'^2$ , e considerando o campo  $E_x$  na posição  $z' = 0$ , temos:

$$E_x(x', y', z')|_{z'=0} = E_1 \frac{w_T}{w_R} \exp\left(-\frac{x'^2}{w_R^2}\right) \exp\left(-\frac{y'^2}{w_R^2}\right) \quad 3.30$$

Usando a equação 3.24 e o integral

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \exp[-(ax^2 + bx + c)] dx = \sqrt{\frac{\pi}{a}} \exp\left[\frac{(b^2 - 4ac)}{4a}\right] \quad 3.31$$

obtemos

$$\eta_c = C_0 \exp\left[-\frac{A(C + jH)}{2B}\right] \exp(-j\psi_0) \quad 3.32$$

onde

$$C_0 = \left[\frac{4D}{B}\right]^{1/2} \quad 3.33$$

$$\psi_0 = AG - \tan^{-1} \frac{G}{D+1} \quad 3.34$$

$$A = \frac{(k \cdot w_T)^2}{2} \quad 3.35$$

$$B = G^2 + (D+1)^2 \quad 3.36$$

$$C = (D+1)F^2 + 2DFG \sin \theta + D(G^2 + D+1) \sin^2 \theta \quad 3.37$$

$$D = \left(\frac{w_R}{w_T}\right)^2 \quad 3.38$$

$$F = \frac{2X_0}{k \cdot w_T^2} \quad 3.39$$

$$G = \frac{2Z_0}{k \cdot w_T^2} \quad 3.40$$

$$H = GF^2 - 2D(D+1)F \sin \theta - GD^2 \sin \theta \quad 3.41$$

O coeficiente de transmissão da potência pode então ser escrito como:

$$T = |\eta_c|^2 = \eta_c \eta_c^* \quad 3.42$$

ou seja

$$T = \frac{4D}{B} \exp\left(-\frac{AC}{B}\right) \quad 3.43$$

As perdas totais do acoplamento em dB, considerando as três fontes de desalinhamento, são obtidas através da seguinte equação:

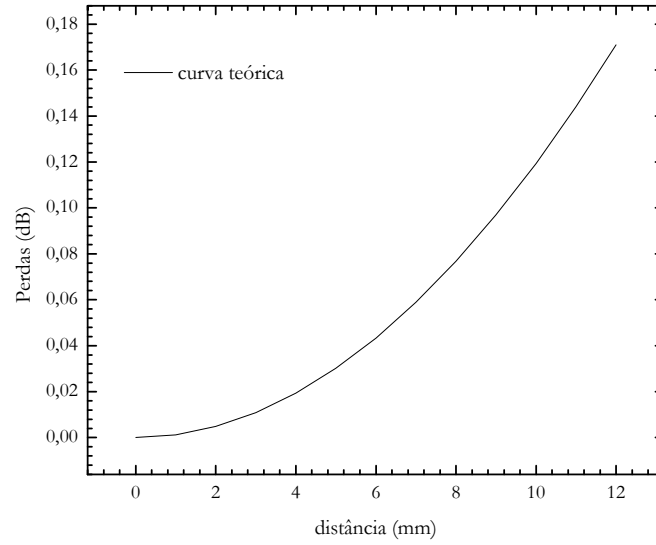
$$L_{tot}(X_0, Z_0, \theta) = -10 \log T = -10 \log \left[ \frac{4D}{B} \exp\left(-\frac{AC}{B}\right) \right] \quad 3.44$$

Quando o alinhamento é perfeito,  $L_{tot} = 0$  dB. Esta situação nunca se verifica na prática, mesmo em condições de alinhamento óptimo. Deve-se ter em conta outros factores, tais como, as imperfeições das lentes e as retro-reflexões das superfícies destas, que podem causar perdas entre 0.2 a 0.3 dB. Deve salientar-se que estas perdas não estão contabilizadas na equação 3.44.

As perdas isoladas para cada tipo de desalinhamento podem ser obtidas recorrendo à equação 3.44. Para a variação da distância entre lentes, as perdas são obtidas do seguinte modo [22]:

$$\begin{aligned} L_s &= L_{tot}(X_0 = 0, Z_0, \theta = 0) - L_{tot}(X_0 = 0, Z_0 = 0, \theta = 0) \\ &= -10 \log \left[ \frac{4w_T^2 w_R^2}{\frac{\lambda^2 Z_0^2}{\pi^2 n^2} + (w_T^2 + w_R^2)^2} \right] \end{aligned} \quad 3.45$$

A Figura 3.8 mostra ao comportamento da equação 3.45.



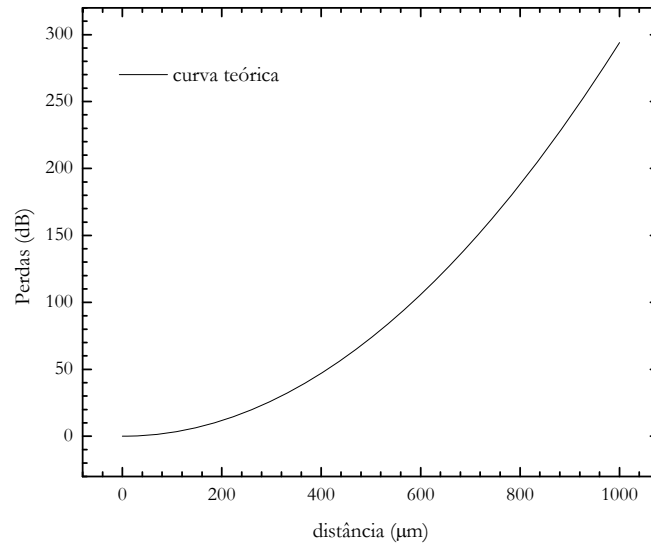
**Figura 3.8** – Dependência teórica para a evolução das perdas com a variação da distância entre lentes GRIN

As perdas introduzidas pelo deslocamento lateral são por seu lado dadas por:

$$\begin{aligned}
 L_l &= L_{tot}(X_0, Z_0, \theta = 0) - L_{tot}(X_0 = 0, Z_0, \theta = 0) \\
 &= \frac{20}{\ln 10} \frac{\pi^2 n^2 (w_T^2 + w_R^2)}{\lambda^2 Z_0^2 + \pi^2 n^2 (w_T^2 + w_R^2)^2} X_0^2
 \end{aligned}
 \tag{3.46}$$

Os resultados da equação anterior encontram-se representados na Figura 3.9.



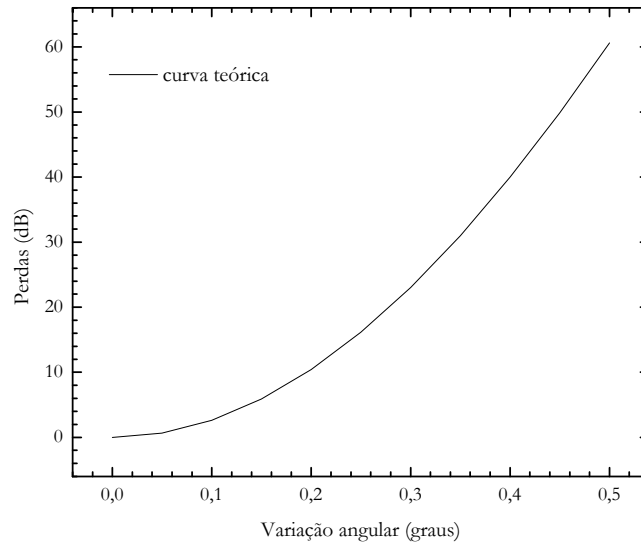


**Figura 3.9** - Dependência teórica para a evolução das perdas com o deslocamento lateral entre lentes GRIN

Por fim, as perdas devido ao desvio angular para uma determinada distância são dadas por:

$$\begin{aligned}
 L_a &= L_{tot}(X_0 = 0, Z_0, \theta) - L_{tot}(X_0 = 0, Z_0, \theta = 0) \\
 &= \frac{20}{\ln 10} \frac{\left(\frac{n \cdot \pi \cdot w_R}{\lambda}\right)^2 \left[ \left(\frac{\lambda Z_0}{n \cdot \pi \cdot w_T^2}\right)^2 + \left(\frac{w_R}{w_T}\right)^2 + 1 \right]}{\left(\frac{\lambda Z_0}{n \cdot \pi \cdot w_T^2}\right)^2 + \left[ \left(\frac{w_R}{w_T}\right)^2 + 1 \right]^2} \sin^2 \theta
 \end{aligned} \tag{3.47}$$

Os resultados da equação anterior encontram-se representados na Figura 3.10.

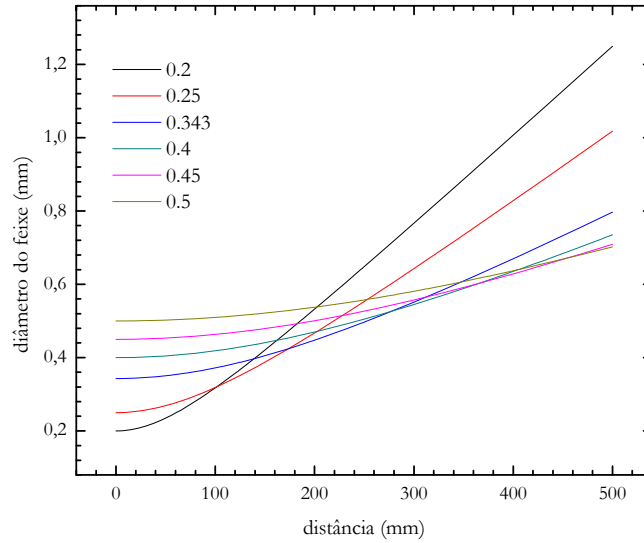


**Figura 3.10** – Perdas do sistema quando se aplica um desvio angular

Também podemos obter as perdas devido aos diferentes tamanhos do diâmetro do feixe gaussiano das duas lentes, quando não existe nenhum dos outros desalinhamentos, através de:

$$\begin{aligned}
 L_a &= L_{tot}(X_0 = 0, Z_0 = 0, \theta = 0, w_T, w_R) - L_{tot}(X_0 = 0, Z_0 = 0, \theta = 0, w_T, w_R = w_T) \\
 &= -10 \log \frac{4}{\left( \frac{w_R}{w_T} + \frac{w_T}{w_R} \right)^2} \qquad 3.48
 \end{aligned}$$

É importante ter conhecimento da tolerância à distância entre lentes GRIN para conexões realizadas em espaço aberto, de modo que se consiga um acoplamento com elevada eficiência. Através da análise da equação 3.45, a tolerância à distância relaciona-se com  $\lambda$ , com a largura do feixe gaussiano à saída da lente GRIN transmissora e com o índice de refração do meio entre as lentes. A tolerância à variação da distância entre as lentes cresce com o aumento da largura do feixe, diminuindo assim a divergência residual, como se pode observar pela análise da equação 3.18 (ver Figura 3.11).



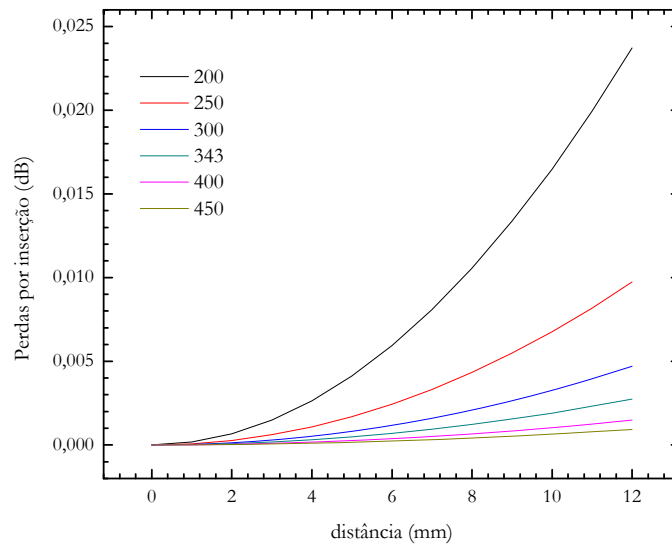
**Figura 3.11** – Variação do diâmetro do feixe em função da separação entre lentes

No caso da fibra óptica associada a cada lente possuir a mesma largura do feixe gaussiano, a equação 3.45 pode ser escrita da seguinte forma:

$$w_T = w_R = w_g$$

$$L_s(Z_0) = 10 \log \left( 1 + \frac{\lambda^2 Z_0^2}{4\pi^2 n^2 w_g^4} \right) \quad 3.49$$

Através da análise da equação 3.49, verifica-se que o aumento do diâmetro do feixe provoca uma diminuição das perdas por inserção. A Figura 3.12 mostra esta relação, os valores foram obtidos variando o diâmetro do feixe entre 200 e 450  $\mu\text{m}$ .



**Figura 3.12** – Variação das perdas por inserção com a separação entre lentes

A sensibilidade aos erros de alinhamento depende do tipo de erro, isto é, as perdas por acoplamento devidas à diferença existente entre a largura do feixe gaussiano para as duas lentes não ser tão sensível como o efeito provocado pela variação angular e pelo deslocamento lateral. Como é possível escolher o tipo de fibra que é acoplada à lente, as perdas de acoplamento surgem da distância entre lentes, do deslocamento lateral e do desvio angular.

### 3.3 Observações

Pode-se concluir que o alinhamento entre lentes colimadoras é de extrema importância, pois qualquer desvio que possa ocorrer durante o processo de montagem, ou mesmo um dano físico após o fabrico, põe em causa a transferência de potência de um elemento para o outro. Dos possíveis desalinhamentos que possam ocorrer, o deslocamento lateral e o desvio angular são os que têm maior influência sobre a potência transmitida.

Na escolha de uma lente GRIN, deve-se ter em atenção o diâmetro do feixe, pois este parâmetro pode determinar a maior ou menor sensibilidade à distância de separação entre lentes colimadoras.

### 4.1 Introdução

O interferómetro de Fabry-Pérot baseia-se na interferência de múltiplos feixes, embora a sua configuração seja simples este interferómetro possui um leque de aplicações bastante largo, como por exemplo: medição precisa de comprimento de onda, análise da estrutura fina das riscas espectrais, determinação do índice de refração de vidros e calibrações métricas. Além de ser utilizado em espectroscopia de elevada resolução espectral, é também, a configuração base de várias cavidades de laser. Pela sua importância no diagnóstico de sistemas de telecomunicações DWDM, este dispositivo foi seleccionado como protótipo a implementar no âmbito do presente trabalho[20, 25-27].

### 4.2 Interferómetro Fabry-Pérot

Um interferómetro de Fabry-Pérot consiste num par de superfícies idênticas, com as faces internas paralelas entre si e com reflectividade  $R$ , distanciadas de  $d$ , ver Figura 4.1.

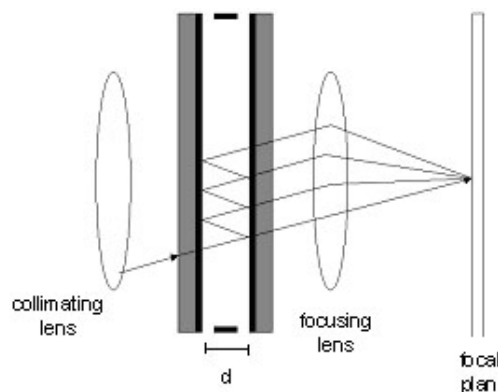


Figura 4.1 – Interferómetro de Fabry-Pérot

Na prática, estas superfícies podem ser espelhos semi-transparentes, placas de quartzo ou mesmo até fibra óptica.

Quando o sistema é usado como interferómetro, a distância  $d$  entre as placas pode variar entre alguns micrómetros até poucos centímetros, mas no caso de ser utilizado como cavidade laser,  $d$  pode alcançar alguns metros. Se esta distância for fixa o interferómetro é designado por *etalon*

A Figura 4.2 ilustra a interferência de feixes múltiplos, que ocorre num interferómetro Fabry-Pérot.

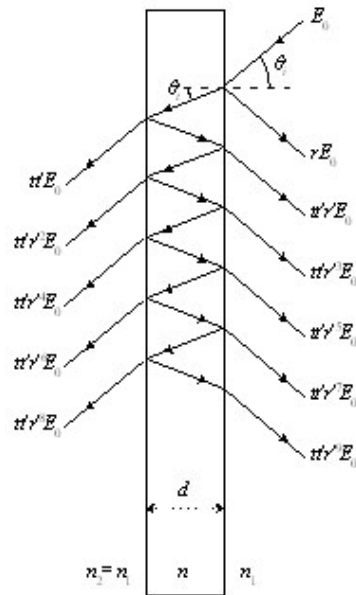


Figura 4.2 – Interferência de feixes múltiplos

Para uma análise mais simplificada das interferências de feixes ocorridas numa lâmina de faces paralelas, com um filme depositado, considera-se que o filme depositado na lâmina é não absorvente, que ambos são dieléctricos transparentes e que  $n_1 = n_2$ . O coeficiente de transmissão  $t$  corresponde à fracção de onda que penetra no filme, e  $t'$  refere-se à onda transmitida depois de atravessar o filme, enquanto que  $r$  e  $r'$  são os respectivos coeficientes de reflexão[20]. Estes coeficientes encontram-se relacionados da seguinte forma:

$$\begin{aligned} tt' &= 1 - r^2 \\ r &= -r' \end{aligned} \quad 4.1$$

As equações 4.1, são válidas quando  $n_1 = n_2$ . Considerando um conjunto de raios reflectidos e paralelos entre si, a diferença de fase entre cada raio e todos os outros reflectidos é constante. As diferenças de fase resultam dos diferentes percursos ópticos e das variações de fase nas consecutivas reflexões que ocorrem. As ondas são, todavia, coerentes entre si e quando colectadas e focalizadas num ponto por uma lente, dão origem a um padrão de interferências, ver Figura 4.3.

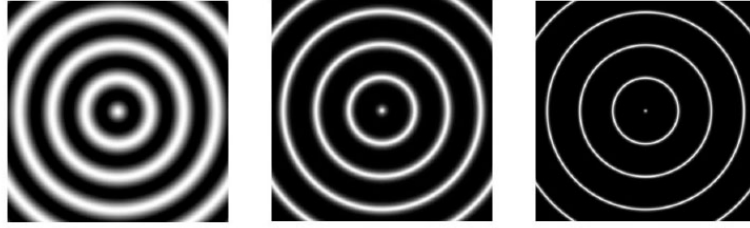


Figura 4 3 – Padrões de interferência para diferentes reflectividades

A diferença entre percursos ópticos de raios adjacentes é dada por:

$$\Lambda = 2 \cdot n \cdot d \cdot \cos(\theta_i) \quad 4.2$$

e a diferença de fase correspondente é:

$$\phi = k_0 \Lambda = \frac{4 \cdot \pi \cdot n \cdot d \cdot \cos(\theta_i)}{\lambda_0} \quad 4.3$$

Fazendo uso da notação complexa, as amplitudes das ondas transmitidas são dadas por:

$$\begin{aligned} E_{1t} &= E_i t t' e^{i\omega t} \\ E_{2t} &= E_i t t' r'^2 e^{i(\omega t - \phi)} \\ E_{3t} &= E_i t t' r'^4 e^{i(\omega t - 2\phi)} \\ &\vdots \\ E_{Nt} &= E_i t t' r'^{2(N-1)} e^{i[\omega t - (N-1)\phi]} \end{aligned} \quad 4.4$$

No total, a onda transmitida é representada pelo somatório de todas estas componentes:

$$E_t = E_{1t} + E_{2t} + E_{3t} + \dots + E_{Nt} = E_i e^{i\omega t} \left[ \frac{t t'}{1 - r'^2 e^{-i\phi}} \right] \quad 4.5$$

A densidade de fluxo transmitido,  $I_t$ , obtém-se do seguinte modo  $I_t = E_t E_t^* / 2$  e, sabendo que,  $I_i = E_0^2 / 2$ , obtemos a densidade de fluxo transmitida:

$$I_t = \frac{(tt')^2}{(1+r^4) - 2r^2 \cos \phi} I_i \quad 4.6$$

Através da identidade trigonométrica  $\cos \phi = 1 - 2 \sin^2(\phi/2)$ , a equação 4.6, toma a forma:

$$I_t = \frac{I_i}{1 + F \sin^2(\phi/2)} \quad 4.7$$

Se nenhuma energia incidente for absorvida, então  $tt' + r^2 = 1$ , a densidade de fluxo da onda incidente deve ser exactamente igual à soma da densidade de fluxo reflectida pelo filme e da densidade de fluxo total transmitido,

$$I_i = I_r + I_t \quad 4.8$$

Na equação 4.7 é introduzida uma nova quantidade, o coeficiente de finesse  $F$ , que é definido por:

$$F = \frac{4r^2}{(1-r^2)^2} = \frac{4R}{(1-R)^2} \quad 4.9$$

onde  $r^2 = R$ .

O termo  $[1 + F \sin^2(\phi/2)]^{-1} = A(\phi)$  é a função de Airy, que traduz a distribuição da densidade de fluxo transmitido.

A finesse do interferómetro de Fabry-Pérot está limitada pelas perdas na sua cavidade, esta consequência deve-se às absorções e ao espalhamento da luz. No entanto, pode considerar-

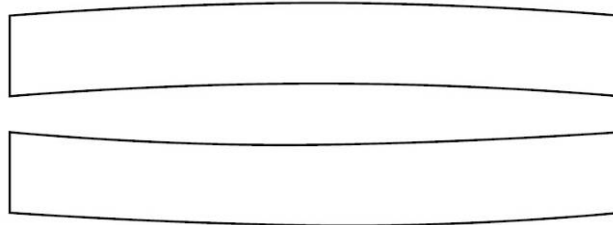


se que estas perdas são provocadas apenas pela absorção nas superfícies com reflectividade elevada[20].

A utilização de revestimentos dieléctricos permite que estas perdas sejam inferiores a 1%, com valores típicos da ordem de 0.2%.

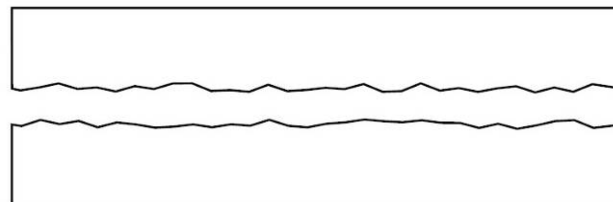
Na prática, as faces do interferómetro nunca são perfeitamente paralelas ou lisas. Por mais pequenas que sejam as imperfeições nas faces, estas provocam uma diminuição da finesse. Os defeitos nas superfícies estão identificados em três grupos[25]:

- *Defeitos de curvatura*



**Figura 4.4** – Defeitos de curvatura

- *Irregularidades na superfície*



**Figura 4.5** – Irregularidades na superfície

- Defeitos de paralelismo

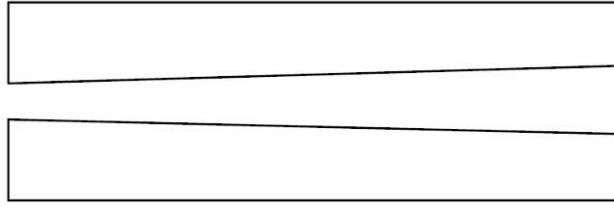


Figura 4.6 – Defeitos de paralelismo

Considerando uma superfície plana e outra esférica, onde a máxima excursão da esférica se encontra a  $\delta_s$  da superfície idealmente plana, a finesse do defeito de curvatura é dada por:

$$F_{DS} = \frac{\lambda}{2\delta_s} \quad 4.10$$

Por outro lado as irregularidades na superfície e os micro-defeitos seguem o modelo de uma distribuição gaussiana  $(\delta_G^2)^{1/2}$

$$F_{DG} = \frac{\lambda}{4.7(\delta_G^2)^{1/2}} \quad 4.11$$

Por último a finesse do defeito por falta de paralelismo é obtida do seguinte modo:

$$F_{DP} = \frac{\lambda}{\sqrt{3}\delta_p} \quad 4.12$$

No total  $F_D$  é:

$$\frac{1}{F_D^2} = \frac{1}{F_{DS}^2} + \frac{1}{F_{DG}^2} + \frac{1}{F_{DP}^2} \quad 4.13$$

Recorrendo ao uso de processos de alinhamento submicrométricos os defeitos de paralelismo tornam-se desprezíveis. Em termos de comparação as irregularidades na superfície são bastante inferiores quando comparadas com os defeitos de curvatura, deste

modo pode-se desprezar estas irregularidades. É então válido assumir que  $F_D \approx F_{DS}$ . De um modo geral, a luz ao atravessar o Fabry-Pérot, espalha-se por um número finito de ângulos, implicando que haja um alargamento do pico de transmissão, logo, uma redução efectiva da finesse. De um modo análogo aos defeitos da placa, temos a finesse da abertura:

$$F_A = \frac{2\pi}{n\Omega} \quad 4.14$$

onde  $n$  é a ordem do pico de transmissão e  $\Omega$  é o ângulo sólido do cone de raios que passam pela cavidade.

A finesse efectiva depende de três quantidades: a finesse  $F$ , que nos mostra a razão entre a distância entre máximos e a largura a meia altura,  $F_D$  e a  $F_A$ . Sendo  $F$ :

$$\mathcal{F} = \frac{\pi\sqrt{F}}{2} \quad 4.15$$

a sua equação geral é a seguinte:

$$\frac{1}{F_E^2} = \frac{1}{\mathcal{F}^2} + \frac{1}{F_D^2} + \frac{1}{F_A^2} \quad 4.16$$

Um acréscimo do coeficiente de finesse  $\mathcal{F}$  pode ser conseguido através do aumento do valor da reflectância,  $R$ , das placas. Podemos afirmar que as maiores limitações da finesse efectiva são as perdas na cavidade e os defeitos de curvatura [20, 25-27].

Comparando com a reflectância das placas, a curvatura é um parâmetro com maior importância. Por esta razão, é usual aproximar  $F_D$  a  $F$  quando pretendemos obter uma determinada resolução espectral.

A função de transferência que nos mostra a transmitância da cavidade é a seguinte:

$$T = \frac{I_t}{I_i} = \frac{1}{1 + F \sin^2\left(\frac{\phi}{2}\right)} \quad 4.17$$

A Figura 4.7, representa a função de transferência descrita anteriormente. Conclui-se que quando  $\delta/2 = m\pi$ , o valor da função de Airy é 1 para qualquer valor de  $F$  e, portanto de  $r$ . Estes máximos ocorrem quando as múltiplas ondas estão em fase. Como estes máximos são independentes da reflectividade, é possível obter uma transmissão elevada mesmo para  $R = 100\%$  [20, 25-27].

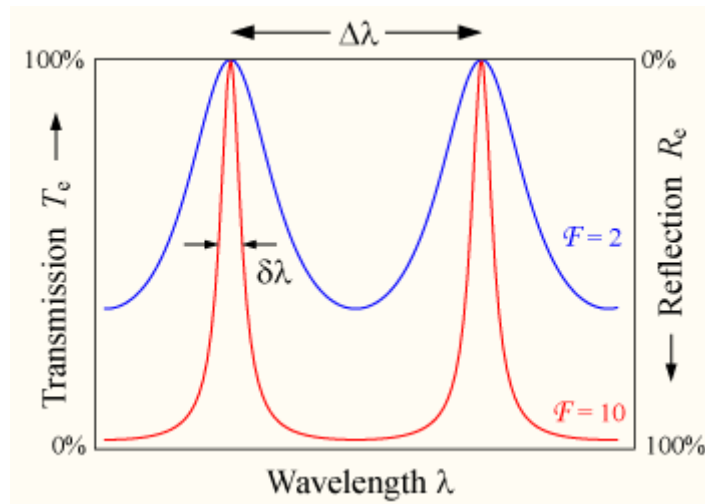


Figura 4.7 – Espectro de transmissão do interferômetro Fabry-Pérot (função de Airy)

A definição das franjas pode ser medida pela largura a meia altura,  $\gamma$ , que é determinada através da seguinte equação:

$$\gamma = \frac{4}{\sqrt{F}} \quad 4.18$$

A distância entre dois picos, conhecida como banda espectral livre, é obtida da seguinte forma:

$$(\Delta\lambda_0)_{bel} = \frac{\lambda_0^2}{2 \cdot n \cdot d} \quad 4.19$$

O poder de resolução cromática,  $R$ , é dada pela razão entre  $\lambda_0$  e o valor mínimo da diferença entre comprimentos de onda resolúveis, ver equação 4.20:

$$\mathcal{R} \equiv \frac{\lambda_0}{(\Delta\lambda_0)_{\min}} \approx \mathcal{F} \frac{2 \cdot n \cdot d}{\lambda_0} \quad 4.20$$

Quando se aumenta o poder de resolução, aumentando a distância entre as placas, a banda espectral livre diminui, conseqüentemente a interpretação do padrão de interferência torna-se mais difícil. Num interferómetro otimizado pretende-se que  $(\Delta\lambda_0)_{\min}$  seja mínimo e que a banda espectral livre,  $(\Delta\lambda_0)_{bel}$ , seja máxima [20]. Ao relacionarmos estas duas variáveis obtemos:

$$\frac{(\Delta\lambda_0)_{bel}}{(\Delta\lambda_0)_{\min}} = \mathcal{F} \quad 4.21$$

Recordando a definição de finesse, que nos diz que esta é obtida através da razão entre a distância entre máximos adjacentes e a largura a meia altura, este resultado não é completamente inesperado.

A função complementar da transmitância poder ser facilmente obtida através da relação:

$$T + R = 1 \quad 4.22$$

Então, a reflectância da cavidade é dada por:

$$R = \frac{F \sin^2\left(\frac{\phi}{2}\right)}{1 + F \sin^2\left(\frac{\phi}{2}\right)} \quad 4.23$$

### 4.3 Observações

Os parâmetros mais importantes que definem um Fabry-Pérot são os comprimentos de onda onde se encontram os picos máximos de transmissão, a banda espectral livre e a finesse. De modo a maximizar a saída, as superfícies deverão ser o mais perfeitas possível, o paralelismo das placas terá que ser controlado e a reflectividade deverá ser otimizada.

O revestimento das superfícies determina a sua reflectividade, logo a finesse. Uma optimização da finesse implica que a escolha das superfícies reflectoras seja um aspecto muito importante bem como o alinhamento relativo entre as mesmas. Este dispositivo é então um óptimo candidato a ser montado por um sistema de alinhamento submicrométrico automático.

### 5.1. Introdução

O sistema de alinhamento de componentes micro-ópticos desenvolvido foi integralmente projectado e desenhado em CAD 3D.

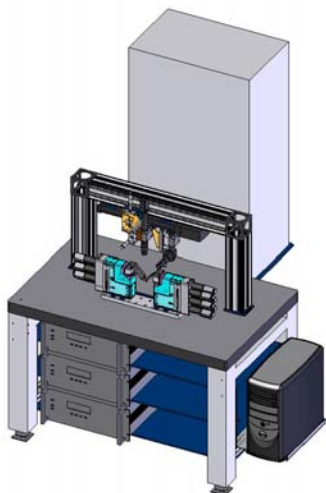
A arquitectura desta plataforma foi desenvolvida considerando que se pretendia uma montagem versátil, de modo a permitir a sua utilização noutras funções para além das pretendidas no decurso deste trabalho.

O processo de desenvolvimento da máquina de visão percorreu vários aspectos, de modo a que a escolha da câmara e das lentes fosse a mais adequada. Estes aspectos serão descritos posteriormente.

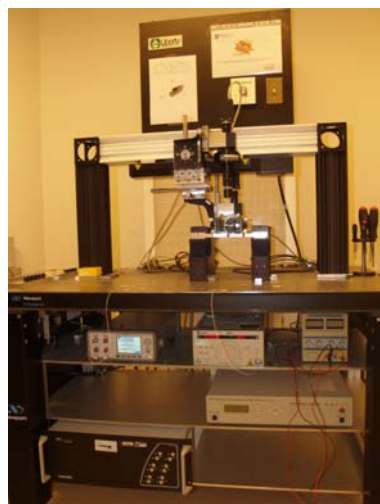
#### 5.1.1. Plataforma Mecânica

De modo a evitar a deposição de micro partículas sobre os elementos micro-ópticos, durante a montagem, usou-se um sistema de fluxo laminar.

O sistema foi montado sobre uma mesa óptica de modo a minimizar os efeitos das vibrações ambientais (ver Figura 5.1 e Figura 5.2).



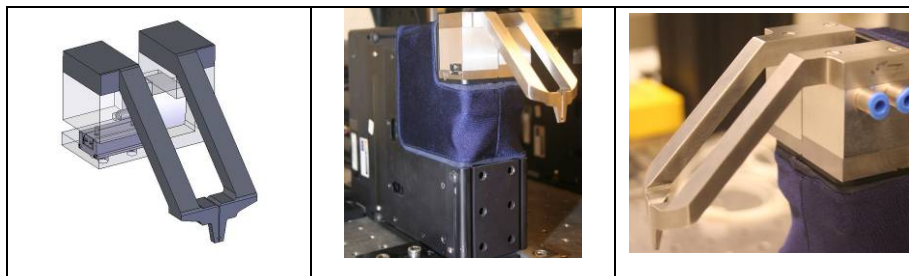
**Figura 5.1** – Esquema CAD 3D da máquina de alinhamento



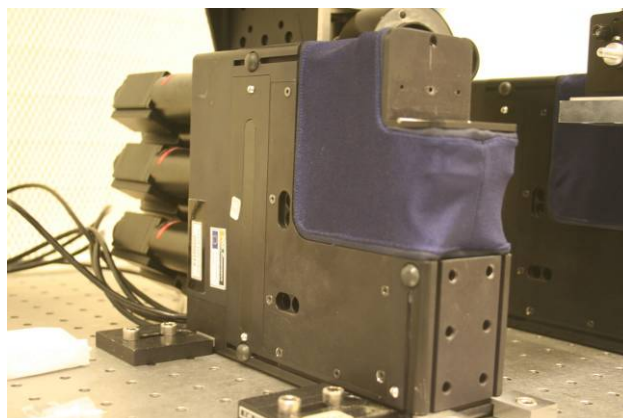
**Figura 5.2** – Máquina de alinhamento implementada no presente trabalho

Para efectuar a manipulação dos componentes micro-ópticos foram projectados e implementados um par de actuadores pneumáticos, que permitem o acoplamento a diversas micro-ferramentas especificamente desenhadas de acordo com as especificações do projecto. Na Tabela 5.1 podem ver-se o protótipo projectado e duas imagens correspondentes à micro-ferramenta desenvolvida para manipulação de lentes GRIN. Pode ainda ver-se a entrada e saída de ar do actuador pneumático.

**Tabela 5.1** – Actuadores pneumáticos



O desenvolvimento deste tipo de dispositivo depende da implementação de ferramentas de alinhamento com diversos graus de liberdade e elevada resolução, que permitam não só alinhar os diversos elementos que constituem o componente, mas também permitir a sua fixação de forma a constituir um dispositivo integrado. Para o sistema a desenvolver optou-se por um par de carruagens motorizadas cada uma com 6 graus de liberdade (*ThorLabs APT604/M*), Figura 5.3, de modo a maximizar os graus de liberdade de alinhamento componente a componente. Conseguindo uma máxima resolução de 40 nm.



**Figura 5.3** – Imagem de uma carruagem



Os eixos das carruagens foram definidos segundo a Figura 5.4

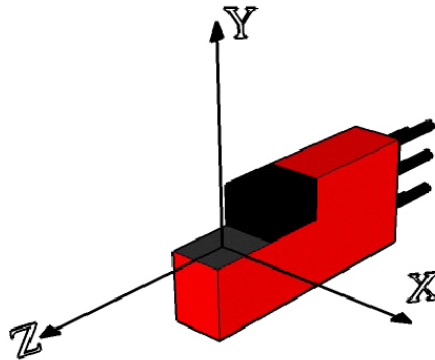


Figura 5.4 – Definição dos eixos

Estes posicionadores são controlados através de software *ActiveX*.

Na mesa óptica, foi montado um pórtico, Figura 5.7, que suportou uma carruagem, da *Newport* modelo ILS250pp, Figura 5.5, de apenas um eixo e com  $0.5 \mu\text{m}$  de resolução, com o intuito de enquadrar as câmaras com o processo de alinhamento.

O suporte do sistema de visão foi conseguido com base em duas carruagens de apenas um grau de liberdade, Figura 5.6, permitindo assim um ajuste fino da posição das câmaras



Figura 5.5 – Carruagem da Newport, modelo ILS250pp



Figura 5.6 – Carruagem de um grau de liberdade

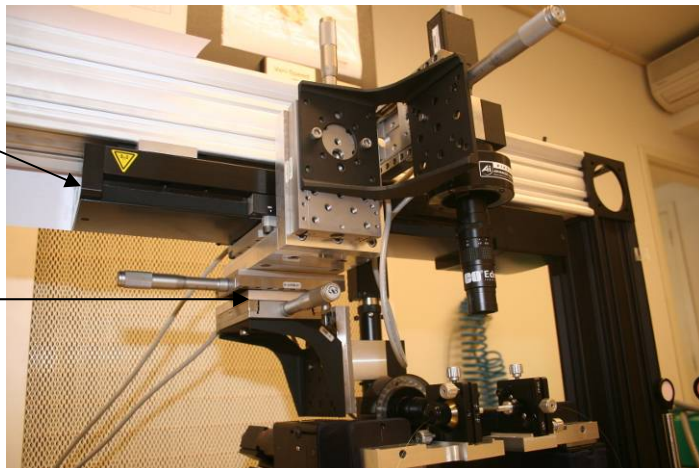
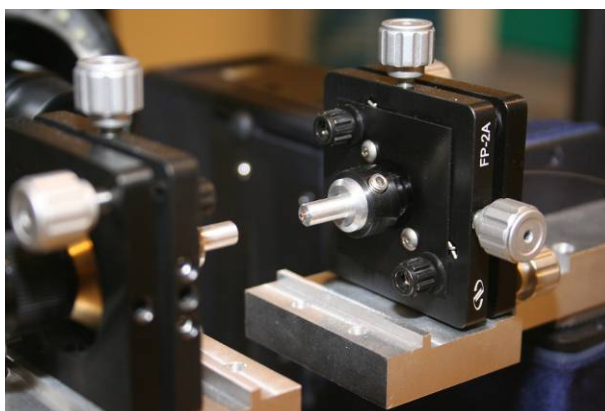


Figura 5.7 – Imagem do pórtico

Dois posicionadores de fibra óptica, *FP-2A* da *Newport*, Figura 5.8, serviram de apoio às lentes GRIN, Figura 5.9, e possibilitaram um pré ajuste das lentes.



**Figura 5.8 –**  
Posicionador da  
Newport



**Figura 5.9 –** Imagem dos posicionadores com as lentes GRIN

### 5.1.2. Máquina de Visão

À semelhança de todos os sistemas de visão artificial, a escolha da câmara e das lentes depende da aplicação que se pretende desenvolver; embora a selecção das lentes possa ser o aspecto mais crítico do sistema de imagem, pois a resolução do sistema é em última análise definida por esta escolha.

#### 5.1.2.1. Desenvolvimento da máquina de Visão

O primeiro aspecto a considerar no desenvolvimento da máquina de visão é decidir se a saída deverá ser digital ou analógica. Como é pretendido que sejam efectuadas medições por processamento e análise de imagem, uma câmara digital torna-se a melhor opção. Uma câmara analógica também poderia ser utilizada, mas neste caso seria necessário utilizar uma placa de aquisição, por este motivo uma câmara digital é a opção correcta, pois não requer uma placa de aquisição para a conversão, conseguindo assim obter uma melhor imagem. Seguidamente, o próximo passo incide sobre a utilização de imagens a cores ou monocromáticas. Visto que a informação de cor não é relevante no processo de alinhamento dos componentes micro-ópticos, optou-se pelo uso de imagens monocromáticas. Comparativamente as câmaras monocromáticas oferecem uma maior resolução, tipicamente mais 10%, possuem uma melhor relação sinal ruído e têm melhor

sensibilidade na presença de baixa luminosidade. Por fim, o último factor, mas bastante importante na escolha da câmara é a resolução do array[28].

As câmaras escolhidas são da *Basler*, modelo A630f, ver Figura 5.10 e Figura 5.11, e possuem um CCD de 1/2" e de elevada resolução (1392×1040). Por outro lado, a escolha das lentes depende do campo de visão e da distância de trabalho. Estas câmaras foram assim equipadas com uma objectiva microscópica com as seguintes características:

**Tabela 5.2**– Especificações da máquina de visão I

	min	max
Ampliação	0.7X	4.5X
Campo de visão (1/2" CCD)	8.8 mm	1.4 mm
Resolução	29 lp/mm	144 lp/mm
Distância de trabalhado ( $\pm 3$ mm)	90 mm	90 mm

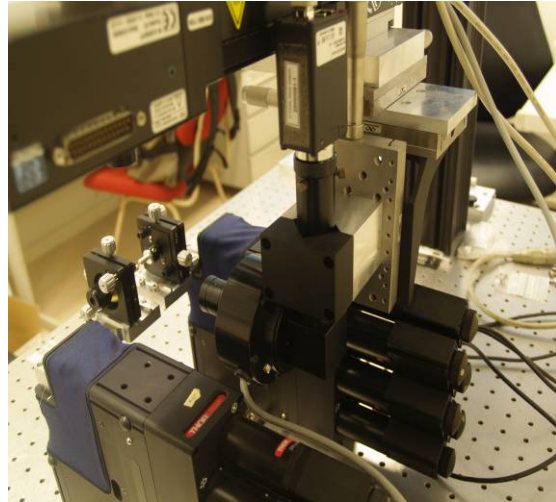
A esta objectiva adicionou-se uma ocular de 0.5× de ampliação. O sistema de visão montado possui as seguintes características:

**Tabela 5.3** – Especificações da máquina de visão II

	Max	Min
Ampliação	3.25x	0.25x
Campo de Visão	2.8mm	17.6mm
Resolução	0.00269 mm/px	0.01692 mm/px

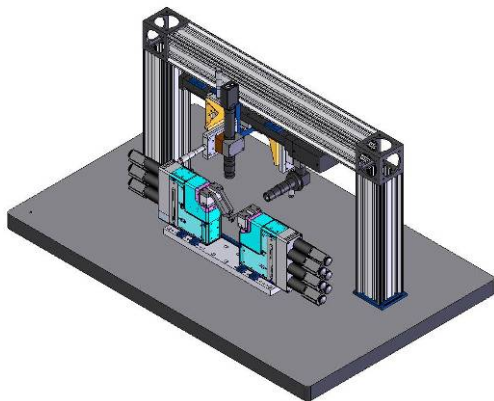


**Figura 5.10** – Câmera e lente do plano superior



**Figura 5.11** - Câmera e lente do plano lateral

Um dos propósitos da utilização das câmeras, foi a visualização em 3D do processo de alinhamento, conseqüentemente, as objectivas foram montadas sobre planos ortogonais.



**Figura 5.12** – Esquema CAD 3D de montagem do sistema de visão



**Figura 5.13** – Imagem do sistema de visão

### 5.1.3. Software de controlo e de aquisição

Todo o software foi desenvolvido com base na linguagem de programação gráfica LabVIEW. O primeiro programa a ser desenvolvido consistia em realizar um alinhamento automático através da máquina de visão, Figura 5.14.

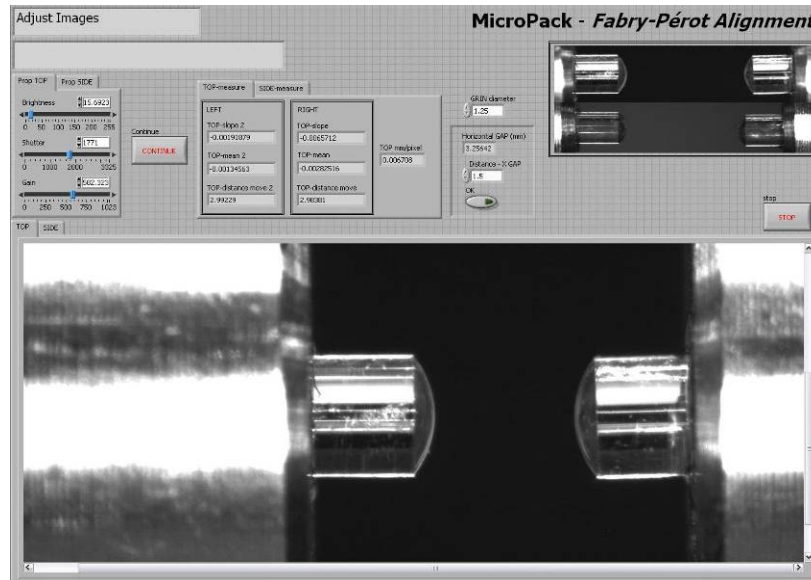


Figura 5.14 – Alinhamento através da máquina de visão

O modo de funcionamento deste sistema consiste, em primeiro lugar, colocar as lentes com igual declive. Neste caso, as lentes eram colocadas com uma inclinação de zero graus, nas duas perspectivas visionadas pelas câmaras. Através da identificação e medição do declive da face superior de cada lente, foi possível fazer este ajuste. Seguidamente, posicionaram-se as lentes de modo a que ficassem alinhadas segundo o eixo das abcissas.

A verificação deste primeiro alinhamento foi verificada medindo a transferência de luz entre as lentes.

Para se poder medir o feixe transmitido foi utilizado um laser sintonizável como fonte de luz e um fotodetector com duplo canal. Com base nestes dispositivos, foi desenvolvido um programa que realizasse uma pesquisa ao longo de dois eixos escolhidos pelo utilizador, Figura 5.15.

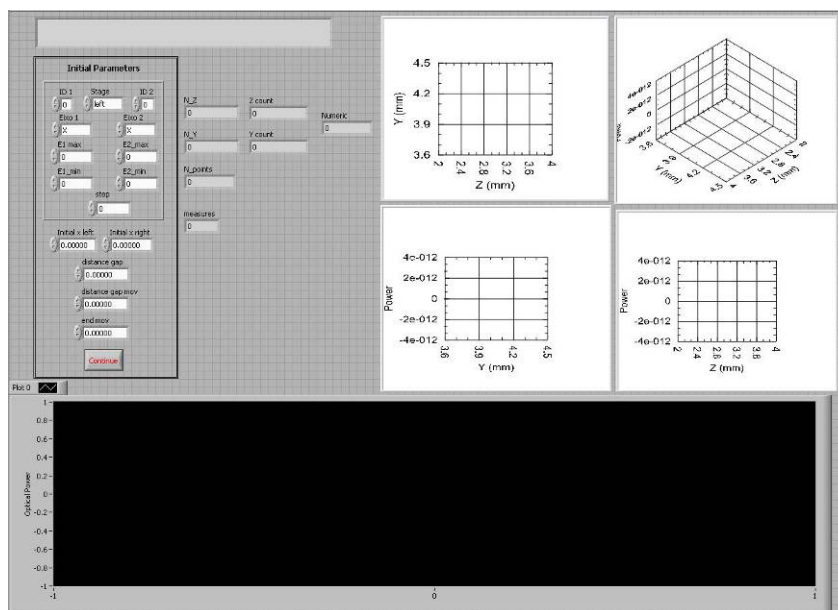


Figura 5.15 – Pesquisa do perfil do feixe

Por exemplo, se o objectivo fosse realizar uma pesquisa segundo o plano ZY, ver Figura 5.4, escolheríamos um dos eixos como eixo principal, e outro como secundário, isto é, primeiramente efectuava-se um varrimento no eixo principal e só no final o secundário era incrementado. Definiríamos o incremento pretendido e, no caso de necessitarmos de medições para diferentes distâncias entre as lentes, poderíamos estipular o  $\Delta x$  relativo ao eixo X.

Num passo seguinte, e devido às dificuldades encontradas no alinhamento, experimentou-se realizar um alinhamento manual, Figura 5.16. Comandando o movimento das carruagens. Introduzíamos um valor, dentro do intervalo permitido, e a carruagem movia-se até atingir a distância definida.





Figura 5.16 – Alinhamento manual

Outros programas com funcionalidades semelhantes foram desenvolvidos, com diferença apenas no tipo de movimento das carruagens.

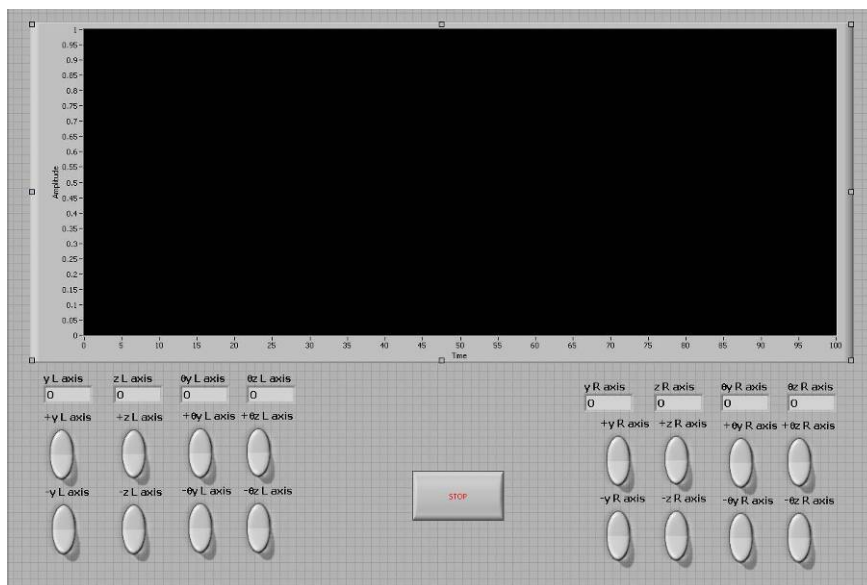


Figura 5.17 – Alinhamento manual II

Com este programa, Figura 5.17, a carruagem parava de se mover quando o botão deixava de ser pressionado.

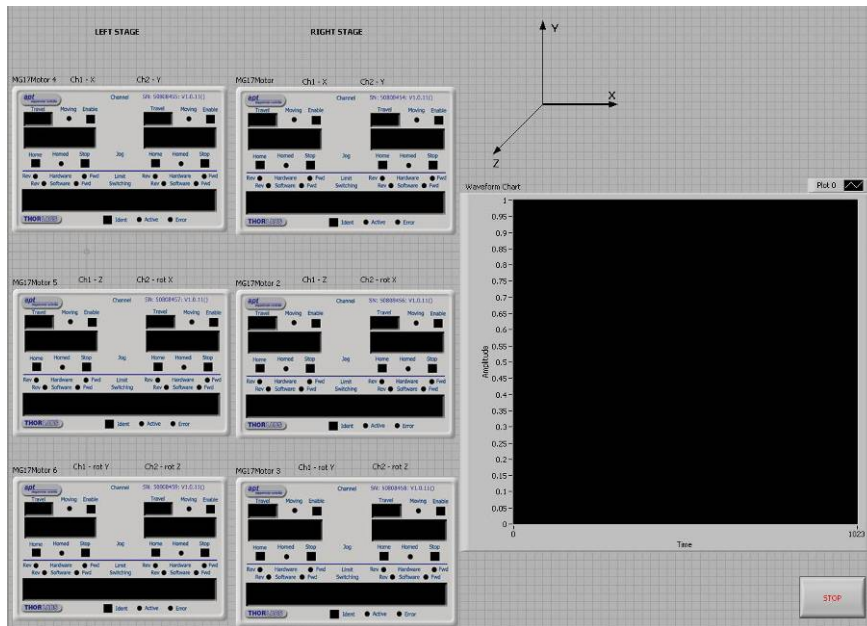


Figura 5.18 - Alinhamento manual III

Neste caso, Figura 5.18, o controlo sobre as carruagens é absoluto, com especificação do tipo de movimento, velocidade e aceleração.

Finalmente desenvolveu-se um programa que conseguia realizar o alinhamento automático, Figura 5.19.

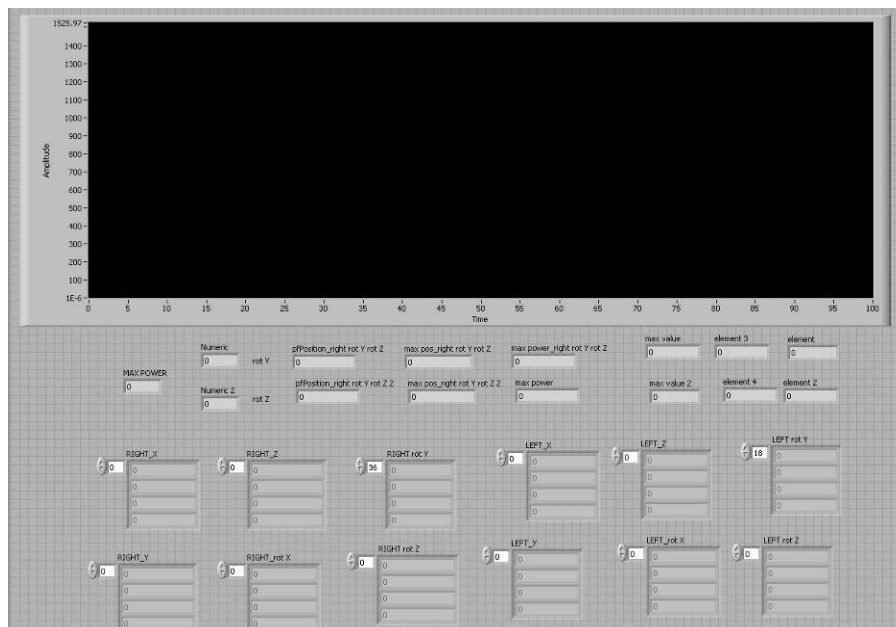


Figura 5.19 – Alinhamento automático




Para conseguir o pretendido, realizar o alinhamento, variaram-se os eixos de rotação de ambas as carruagens, excepto o correspondente ao eixo X. Em primeiro lugar, movem-se os eixos rotacionais de Y. A carruagem da esquerda coloca este eixo na posição 0, de seguida a outra carruagem realiza um varrimento contínuo, que percorre a totalidade do seu percurso. No fim deste varrimento, é incrementada a posição da carruagem da esquerda e a carruagem da direita volta a repetir o varrimento. Este conjunto de movimentos termina quando a carruagem da esquerda chega ao fim do seu percurso. No fim, é localizado o ponto correspondente ao máximo da potência óptica transmitida, e as carruagens são posicionadas nesse ponto, a uma velocidade e aceleração reduzidas de modo a diminuir o erro introduzido por este movimento. Garantimos assim a existência de um ponto onde o alinhamento neste eixo será máximo. Os mesmos movimentos são repetidos para o eixo rotacional de Z. Após a localização do máximo é realizado um ajuste fino, movendo das carruagens com um passo e velocidade reduzida.

## Capítulo VI – Alinhamento das lentes GRIN

### 6.1 Lente GRIN - fibra

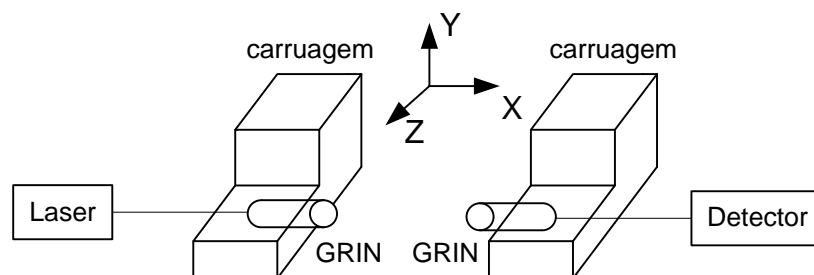
Foram adquiridas três lentes GRIN com diferentes características provenientes de fornecedores distintos para selecção da melhor opção para o desenvolvimento do filtro sintonizável. As características de cada lente encontram-se na Tabela 6.1.

**Tabela 6.1**– Características das lentes GRIN

			
Marca	Lightpath	Thorlabs	NSG
Modelo	T1527Y0S1-20A	50-1550	FCS-18-C-G-S-020
$\lambda$ (nm)	1550	1550	1550
Perdas por Inserção (dB)	0.3	0.2	<0.2
Distância de Trabalho (mm)	2-15	20	20
Diâmetro do feixe (mm)	0.58	0.5	0.35
Comprimento da lente (mm)	3.2	3.8	4.48

O primeiro processo de alinhamento implementado foi através da utilização da máquina de visão.

O esquema de montagem foi o seguinte:

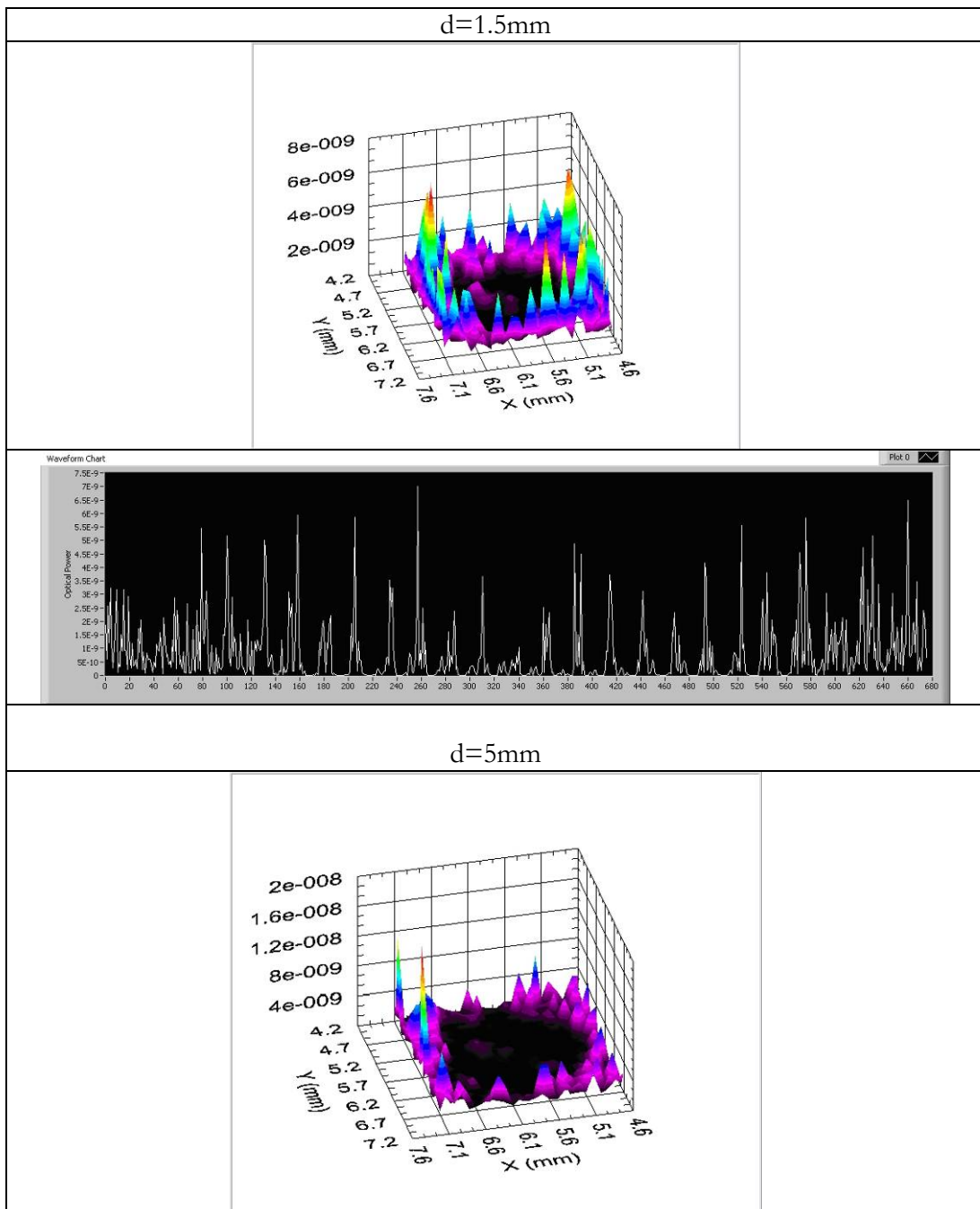


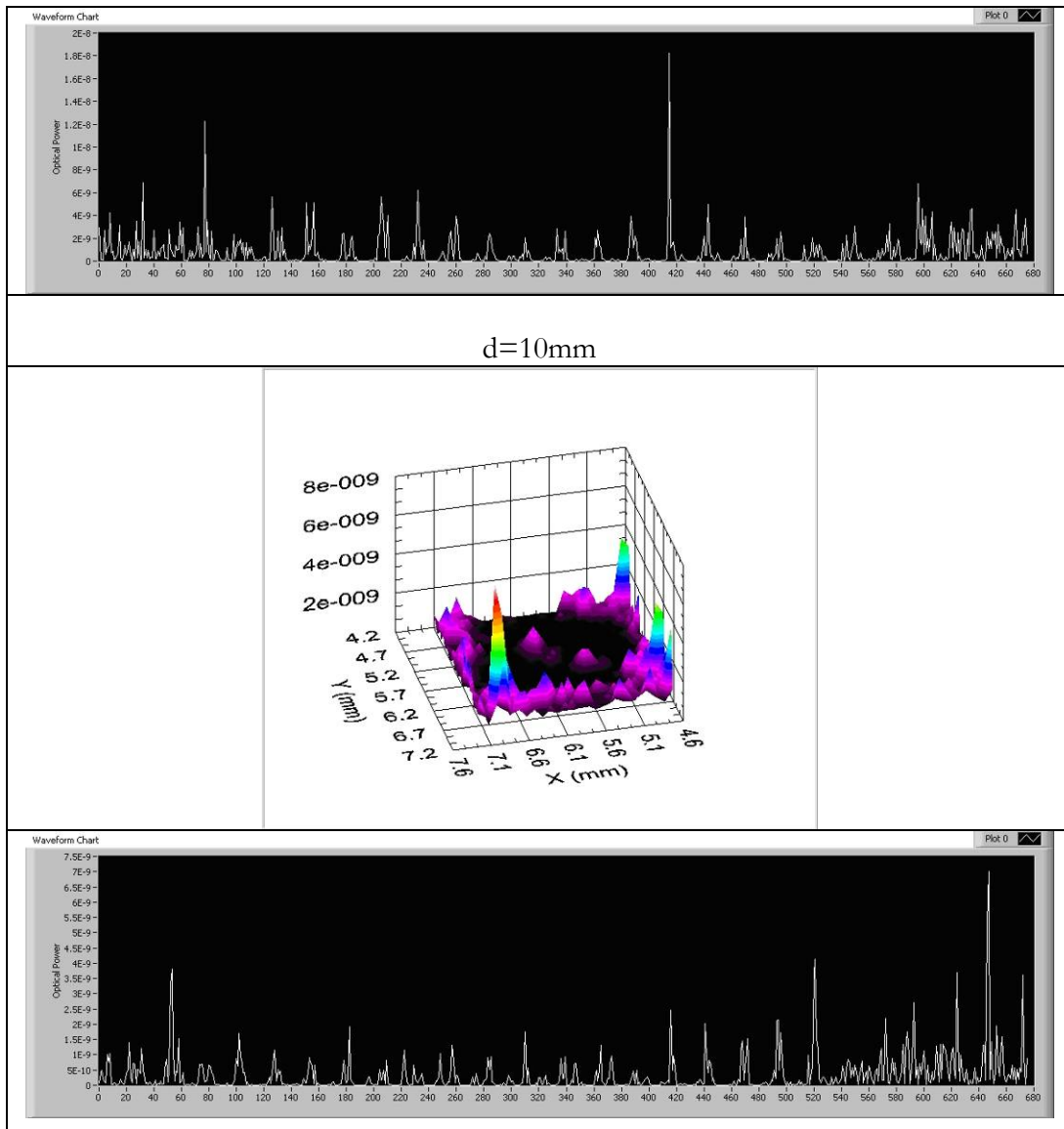
**Figura 6.1** – Esquema de montagem entre duas lentes GRIN

- Lentes: Lightpath
- $P_i=1\text{mW}$
- passo da carruagem= $0.1\text{ mm}$

O ciclo de medição usado para realizar o alinhamento pretendido encontra-se descrito na página 57 (ver Figura 5.14). Foram efectuadas medições para diferentes distâncias entre lentes GRIN. A distância mínima foi definida pelo utilizador, tendo como critério evitar a colisão das lentes. Os resultados podem ser observados na Tabela 6.2.

**Tabela 6.2** – Medição do feixe entre lentes da Lightpath para diferentes distâncias entre lentes



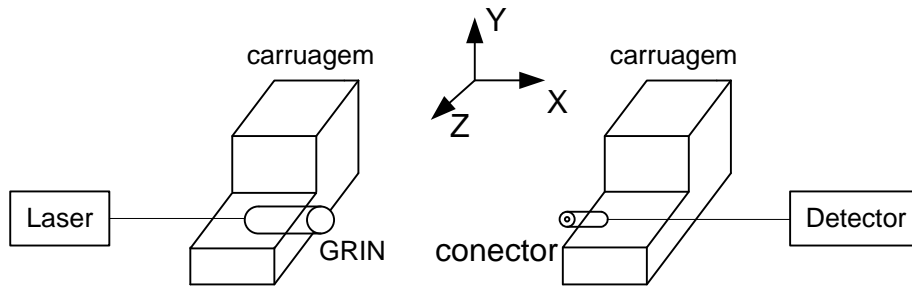


$d=10\text{mm}$

Pela análise dos resultados podemos concluir que as lentes poderiam estar danificadas, ou o passo dado em cada movimento seria demasiado grande – perdendo os picos de potência entre cada movimento intermédio – e/ou o alinhamento efectuado pela máquina de visão não era suficientemente preciso. Com esta medição seria esperado observar um espectro com uma forma gaussiana.

De modo a podermos obter melhores conclusões, foi realizado o seguinte teste:

- Esquema da montagem

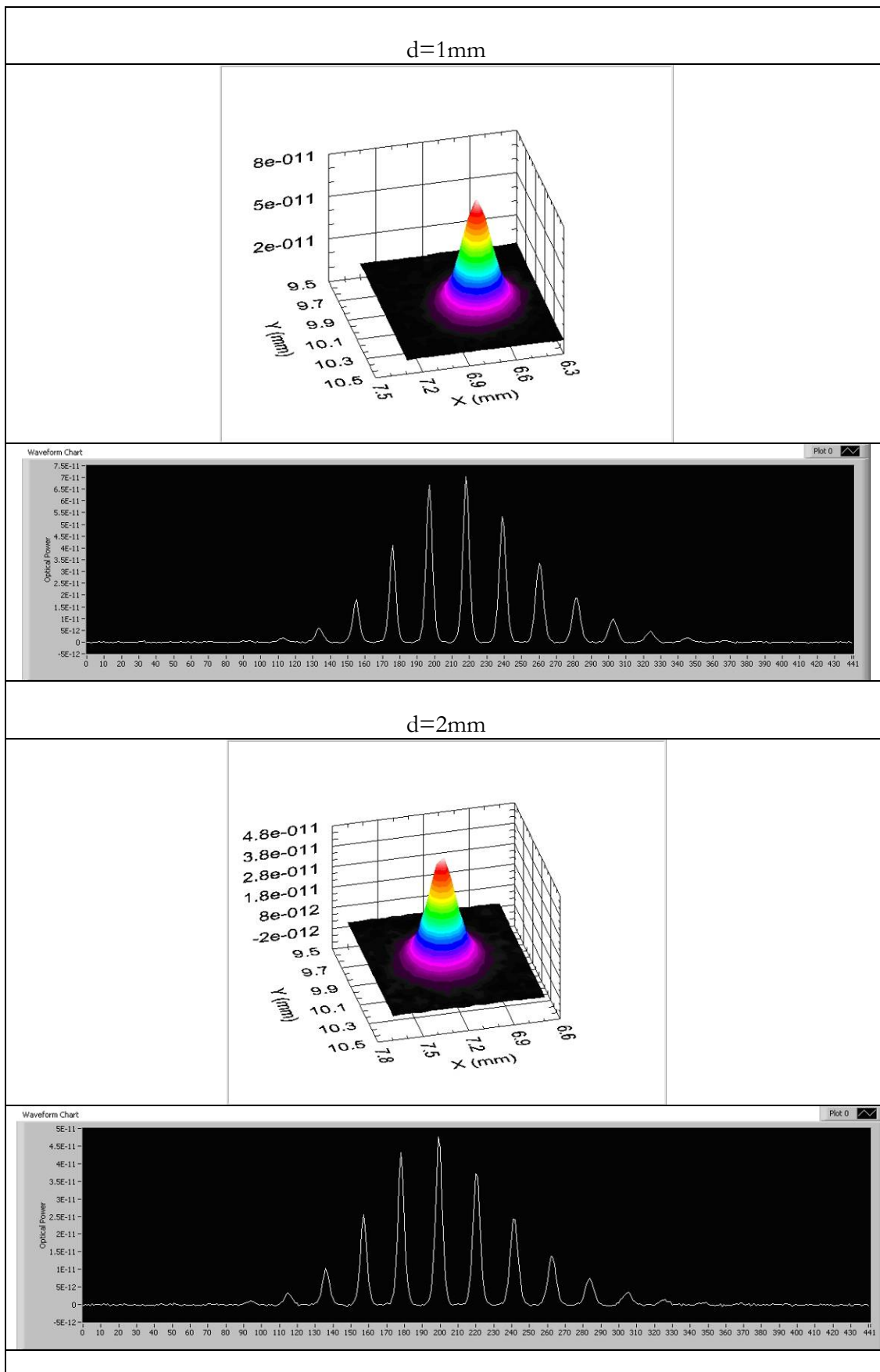


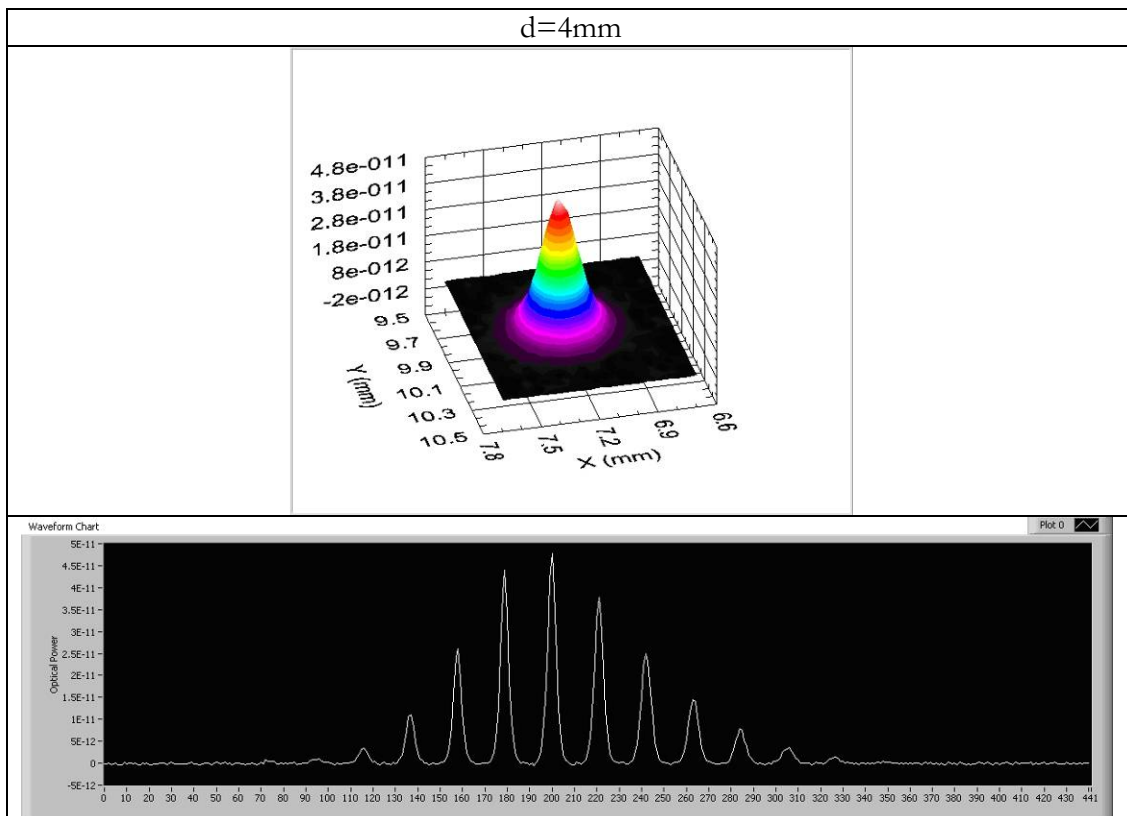
**Figura 6.2** – Esquema de montagem entre lente GRIN e um conector

- o conector usado continha uma fibra com uma bainha reduzida por taper para um diâmetro de  $30\ \mu\text{m}$ , permitindo que as medidas fossem obtidas com uma maior resolução.
- Potência injectada no sistema = 2 mW.
- O passo dado entre cada medição foi de 0.05 mm.
- Realizaram-se medições para diferentes distâncias entre lentes GRIN.

Antes de dar início às medições, foi realizado um alinhamento prévio através da máquina de visão de modo a garantir que a face da lente estivesse o mais paralela possível à face do conector. Os resultados encontram-se na Tabela 6.3. Nestas condições consegue-se observar que o perfil do feixe tem uma forma gaussiana, conforme o esperado. A utilização da fibra óptica para amostrar a distribuição de potência permite obter uma clara medição do perfil do feixe, mas a potência máxima obtida é muito reduzida sendo apenas representativa.

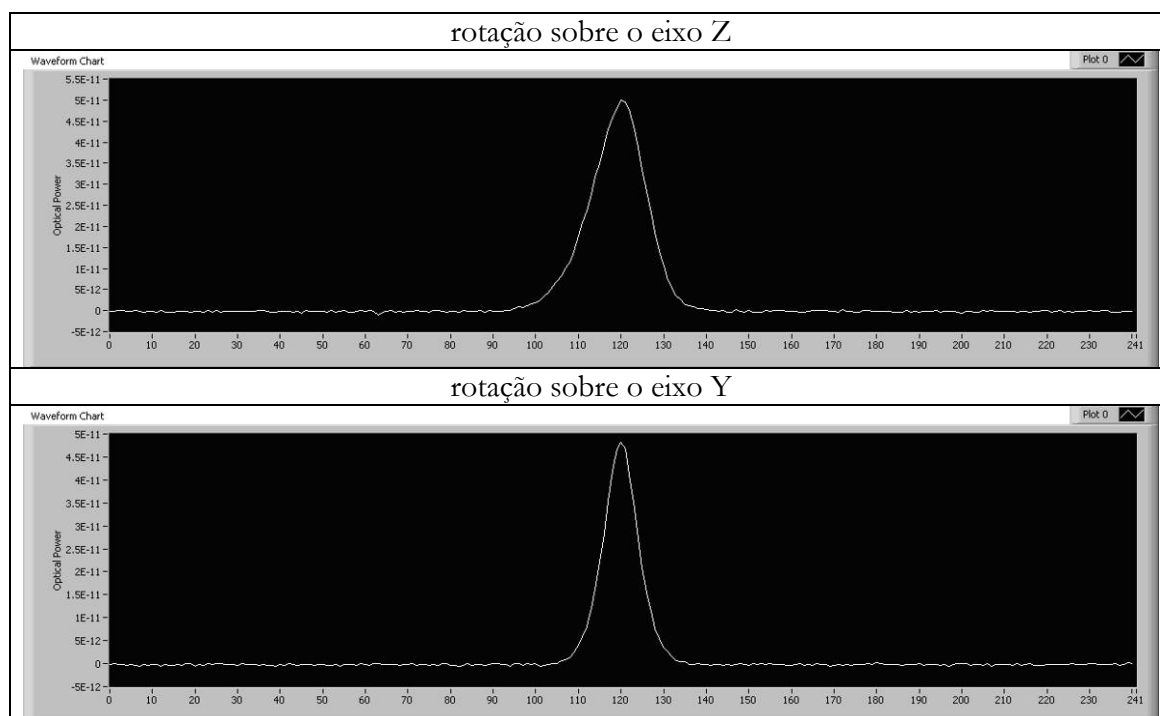
**Tabela 6.3** – Resultados da medição realizada entre GRIN (Lightpath) e conector para diferentes distâncias de separação





De seguida, colocaram-se as carruagens na posição onde o perfil tem o valor máximo e efectuou-se uma pesquisa segundo os eixos rotacionais, verificando assim que as carruagens se encontravam centradas no ponto de máxima potência. Os resultados encontram-se na Tabela 6.4

Tabela 6.4 – Resultados da variação dos eixos rotacionais em Z e Y



Através das figuras da Tabela 6.4, podemos verificar que as carruagens se encontram efectivamente centradas no ponto de máxima potência. A causa do pico encontrado possuir um baixo valor de potência, deve-se à reduzida eficiência de acoplamento do feixe colimado pela lente GRIN à fibra óptica receptora.

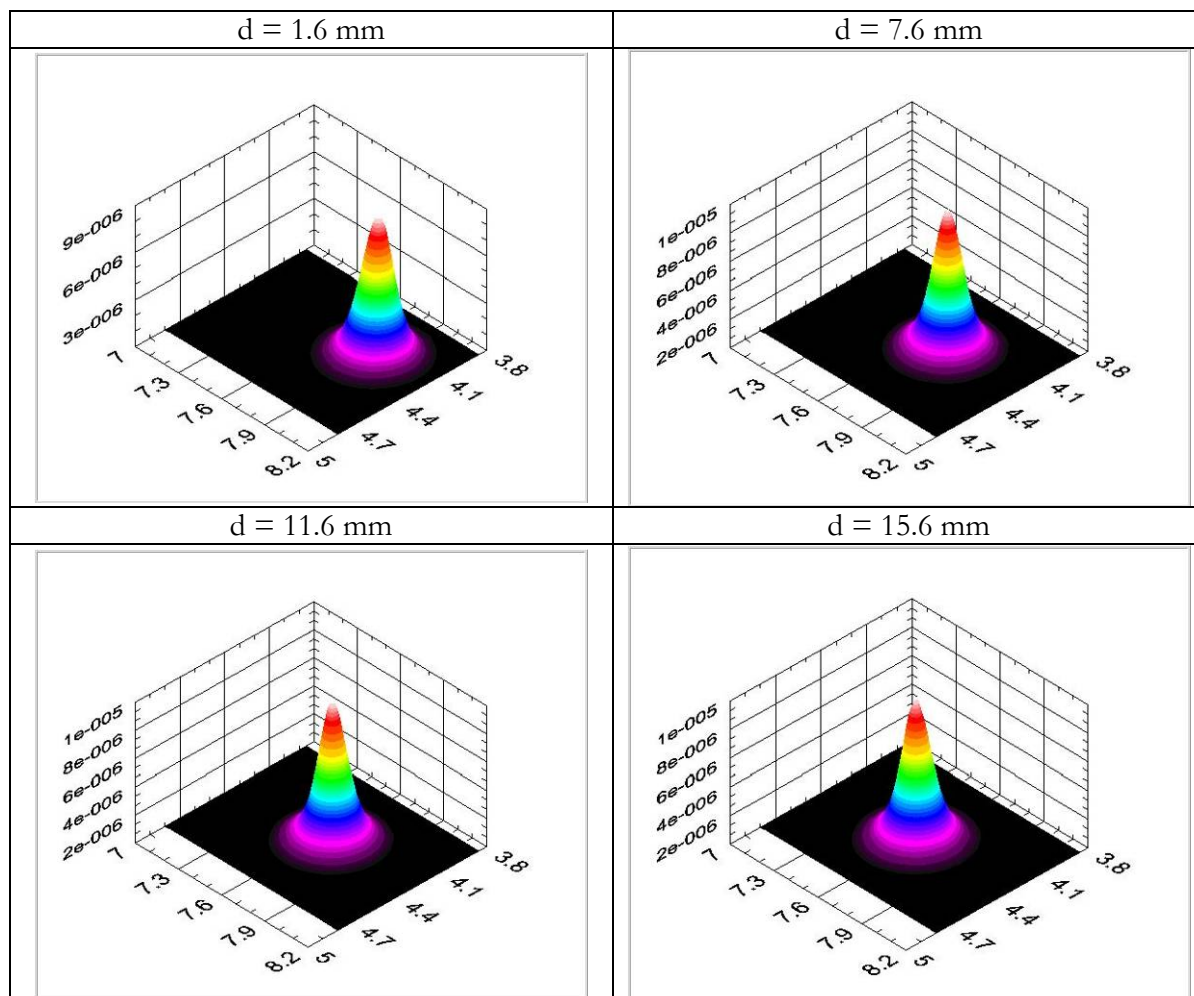
Com o teste seguinte pretendeu-se investigar o alinhamento relativo entre lente GRIN e conector por análise da distribuição espacial da potência para diferentes distâncias entre lentes, com um passo inferior ao do teste anterior. Se o alinhamento for perfeito o pico encontrado não se deverá deslocar, mas apenas ocorrerá divergência, ou seja, alargamento do diâmetro do feixe.

As condições da experiência foram as seguintes:

- Esquema (Figura 6.2)
- Lente da Lightpath
- $P_i = 2\text{mW}$
- Espaçamento inicial entre lente e conector =  $1.6\text{mm}$
- Separação entre lente-conector entre cada ciclos de medição  $[1.6;15.6]\text{mm}$ , com um passo de  $2\text{mm}$
- Passo de cada ciclo de medição  $0.01\text{mm}$



**Tabela 6.5** – Medições entre lente GRIN(lightpath) e conector com um passo de 0.01mm, para diferentes distâncias de separação



Pela análise da Tabela 6.5, conclui-se que, o uso apenas da máquina de visão não permite um alinhamento perfeito. Note-se que a máxima potência obtida foi bastante inferior quando comparada com a potência injectada no sistema. A reduzida qualidade do alinhamento pode também ser observado pelo desvio do feixe sobre o plano transversal. Estes efeitos devem-se principalmente ao desvio angular, e lateral, como já referenciado no capítulo 3.2.

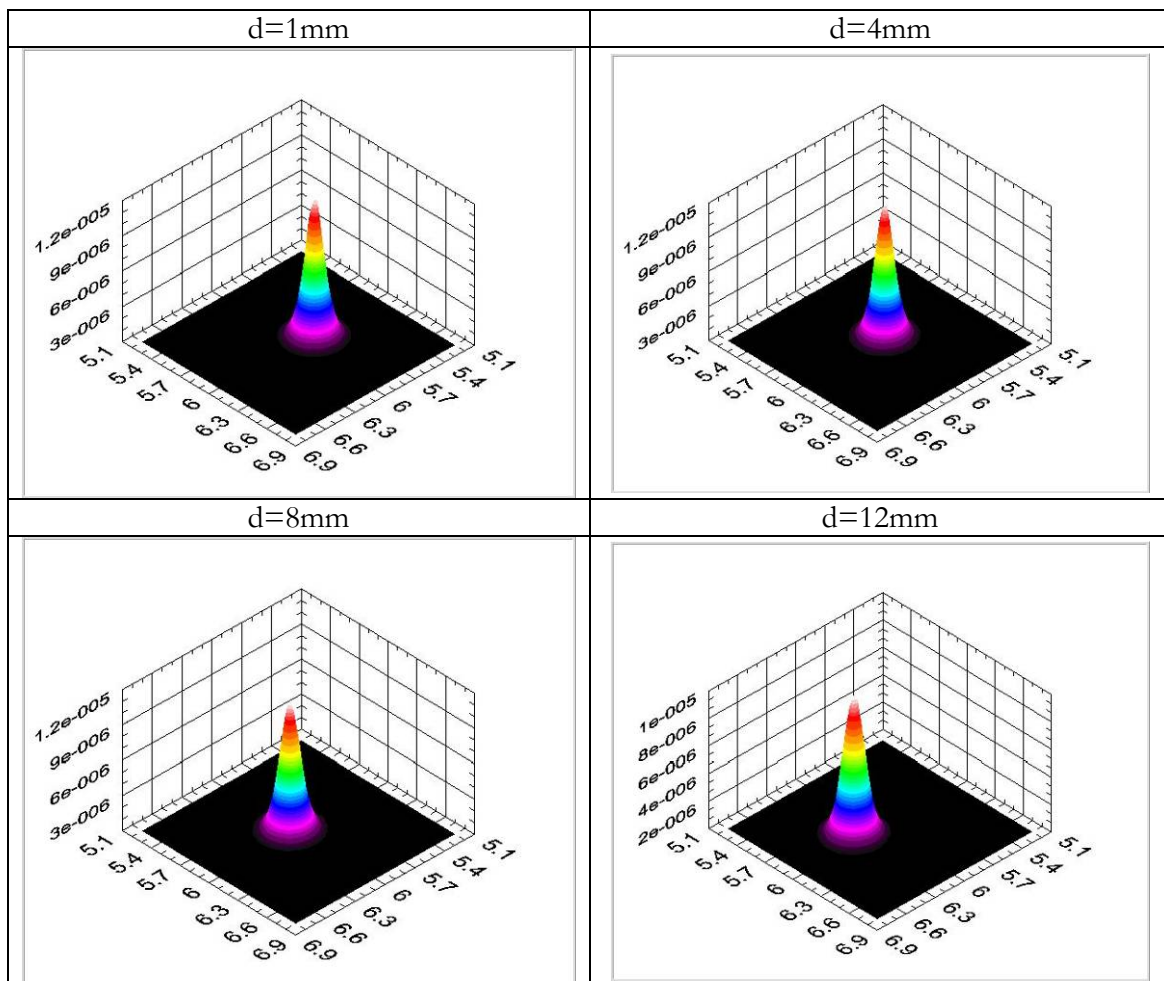
Seguidamente repetiram-se as experiências mas com outro modelo de lente, com o intuito de se verificar as conclusões obtidas com as lentes da Lightpath.

Com o modelo da Thorlabs realizou-se o seguinte ensaio:

- Esquema (Figura 6.2)
- Lente da Thorlabs
- $P_i=2\text{mW}$
- Espaçamento inicial entre lente e conector = 1.0mm
- Separação entre lente-conector entre cada ciclos de medição [1.0;12.0]mm, com um passo de 1mm
- Passo de cada ciclo de medição 0.01mm

Como no teste anterior, o paralelismo entre a face da lente e do conector foi otimizado, recorrendo à máquina de visão. Os resultados podem ser observados na Tabela 6.6.

**Tabela 6.6** – Resultados da medição do feixe entre GRIN (Thorlabs) e conector para diferentes distâncias de separação



Tal como nos resultados anteriores, observa-se o desvio do feixe e a potência máxima obtida continua baixa.

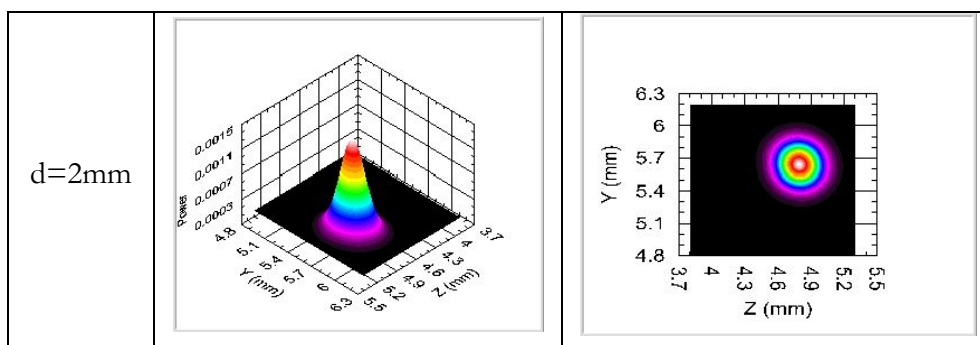
## 6.2 Lente GRIN – Lente GRIN

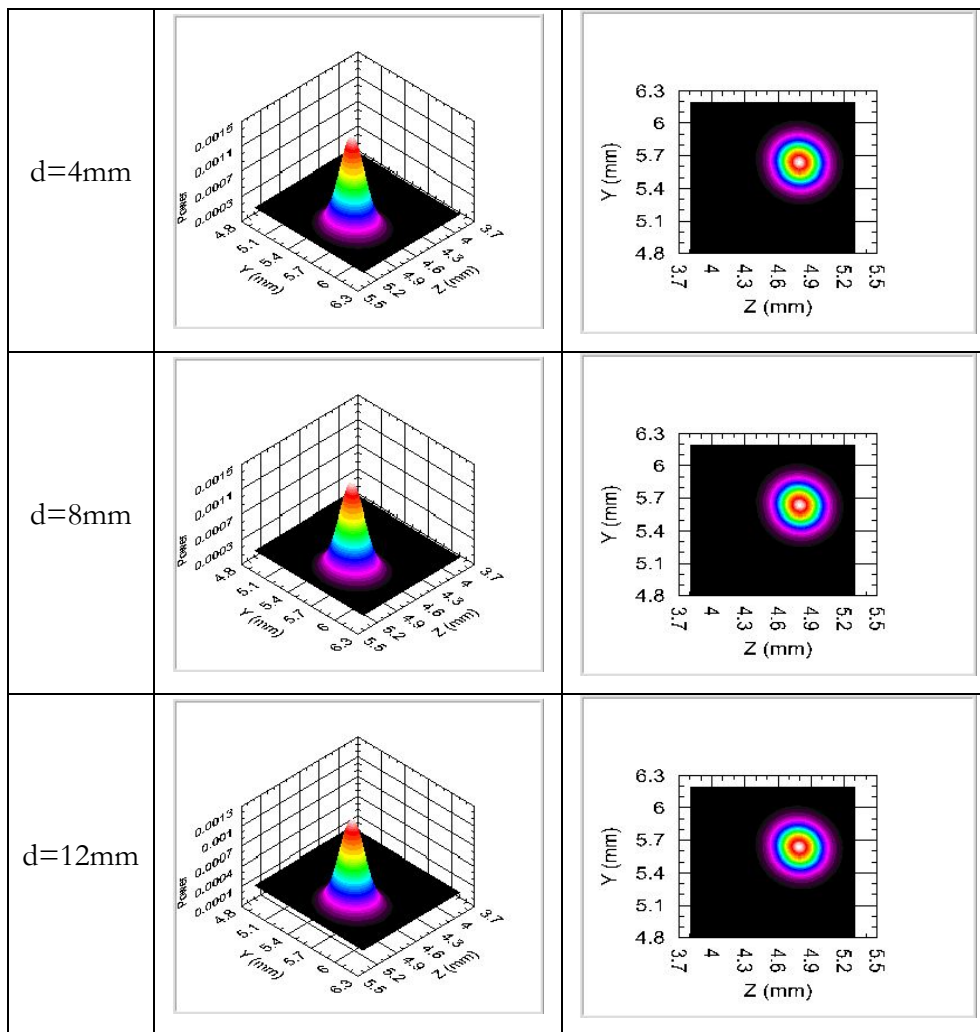
De modo a otimizar o alinhamento entre lentes, optou-se por realizar um refinamento manual do alinhamento por maximização da potência transmitida através dos programas descritos pelas Figura 5.16, Figura 5.17 e Figura 5.18. Este controlo manual sobre as carruagens, condiciona o tempo para maximização da potência transmitida, pois era frequente a identificação de máximos locais. Após a maximização da potência, e fixando 10 dos 12 graus de liberdade das carruagens, realizou-se a medição da potência para diferentes distâncias de separação entre as lentes GRIN e diferentes deslocamentos laterais, utilizando os seguintes parâmetros:

- Esquema Figura 6.1
- Lentes da Thorlabs
- $P_i=2\text{mW}$
- Espaçamento inicial entre lentes=2.0mm
- Separação entre lentes entre cada ciclos de medição [2.0;12.0]mm, com um passo de 1mm
- Passo de cada ciclo de medição 0.01mm

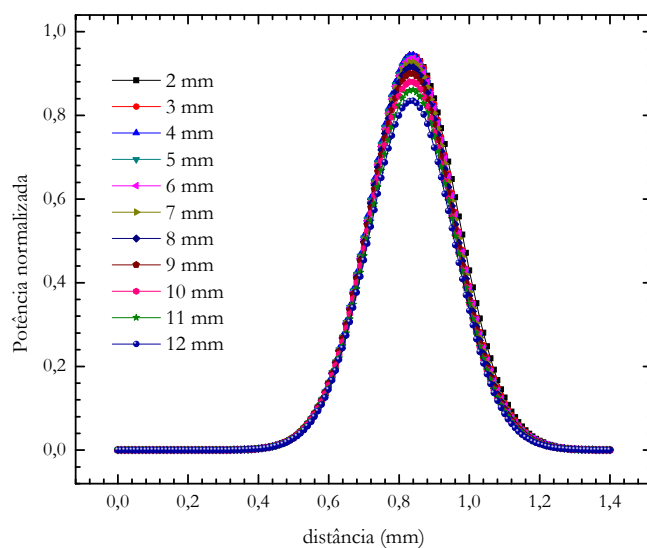
Os resultados encontram-se na Tabela 6.7.

**Tabela 6.7** – Resultados da medição do feixe entre GRIN-GRIN (Thorlabs) para diferentes distâncias de separação, após a optimização da potência.



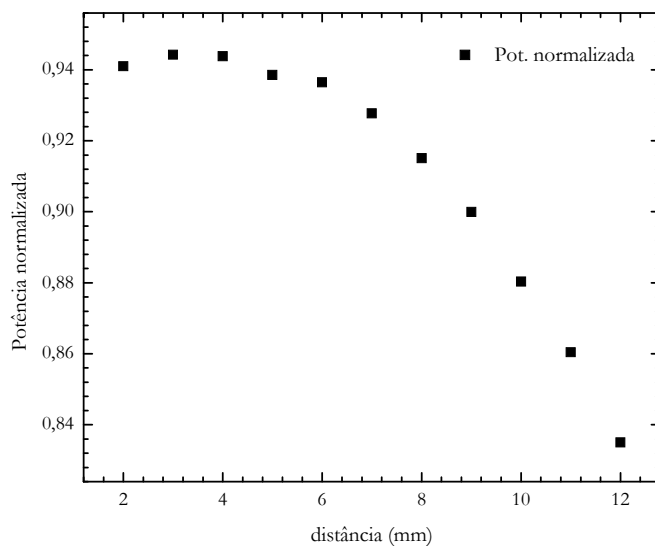


Nestas condições a potência máxima encontrada já corresponde a uma situação de reduzidas perdas de transmissão, embora ainda se verifique um ligeiro desvio do feixe que evidencia a possibilidade de se poder realizar um refinamento adicional do alinhamento (ver Figura 6.3).



**Figura 6.3** – Representação do perfil do feixe para diferentes distâncias entre lentes (Thorlabs)

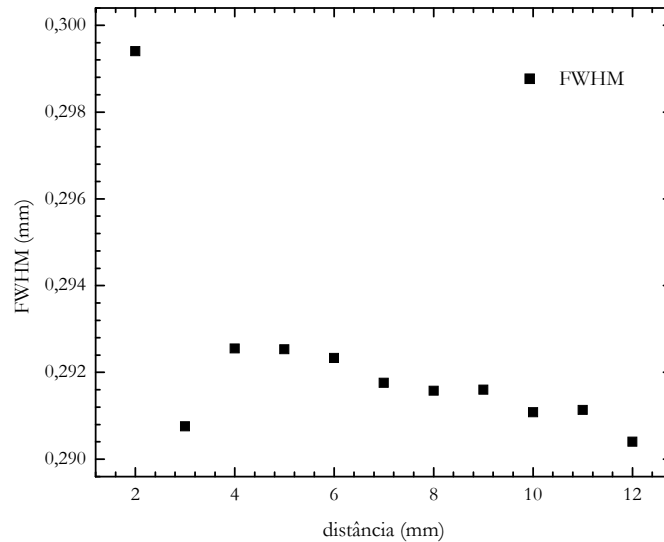
A Figura 6.4 mostra a dependência da potência em função do aumento da distância entre lentes.



**Figura 6.4** – Variação da potência com o aumento da distância entre lentes (Thorlabs)

Na Figura 6.5 é mostrada a dependência do diâmetro do feixe para distâncias crescentes entre as lentes GRIN. Estes valores foram obtidos, como referido acima, por medição da potência por varrimento sobre o plano transversal. A dependência observada não

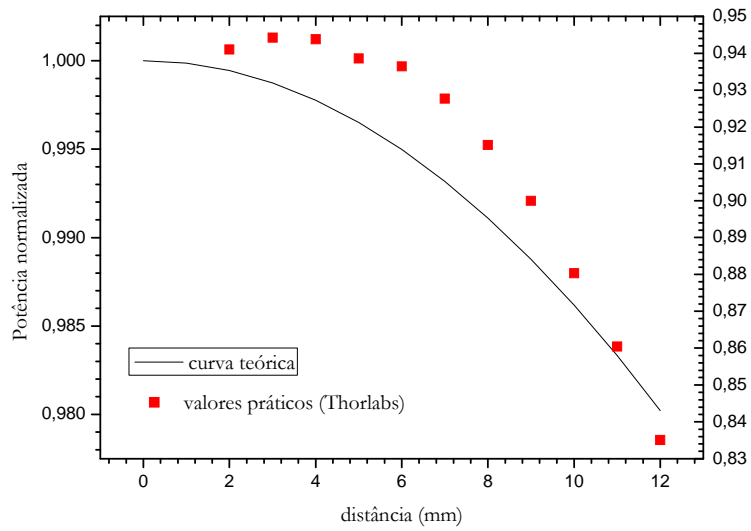
corresponde à esperada para uma lente GRIN com *pitch*  $\frac{1}{4}$ , o que evidencia uma ligeira convergência do feixe em relação à colimação perfeita do feixe.



**Figura 6.5** – Variação do diâmetro do feixe vs. separação entre lentes (Thorlabs)

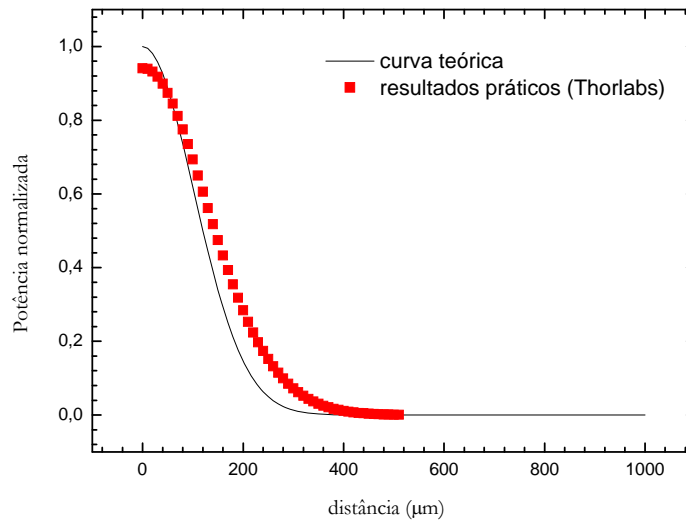
As **Figura 6.6** e **Figura 6.7** mostram a comparação entre a dependência teórica e os valores da potência obtidos experimentalmente por o aumento da distância de separação entre lentes e do deslocamento lateral.

Na **Figura 6.6** pode observar-se que os valores obtidos pelos ensaios apresentam uma dependência semelhante à curva teórica, as diferenças devem-se às especificidades das condições experimentais (desalinhamento angular, imperfeições das lentes, etc.).



**Figura 6.6** - Perdas introduzidas pela separação entre lentes (Thorlabs), comparação com valores teóricos

Também no caso do deslocamento lateral, o comportamento dos valores práticos são concordantes com o comportamento esperado teoricamente (ver Figura 6.7)



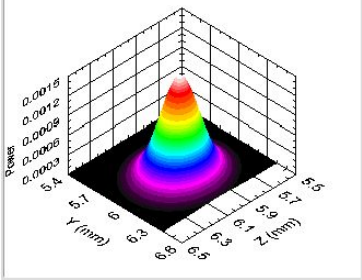
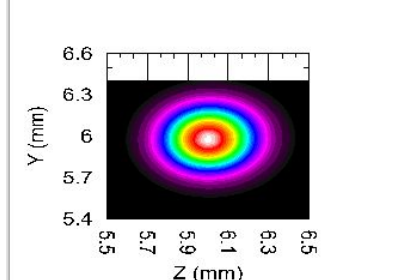
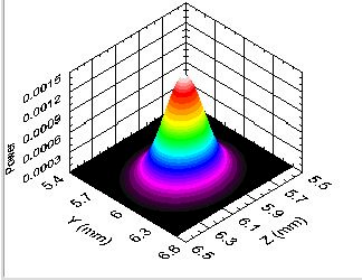
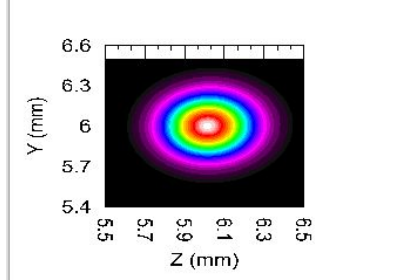
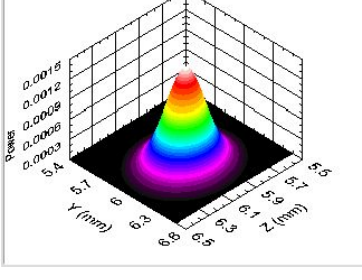
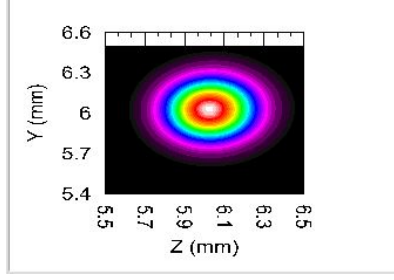
**Figura 6.7** - Perdas introduzidas pelo deslocamento lateral entre lentes (Thorlabs), comparação com valores teóricos

Seguindo o procedimento experimental utilizado nas lentes da Thorlabs, repetiram-se as medições para as lentes da Lightpath com os seguintes parâmetros:

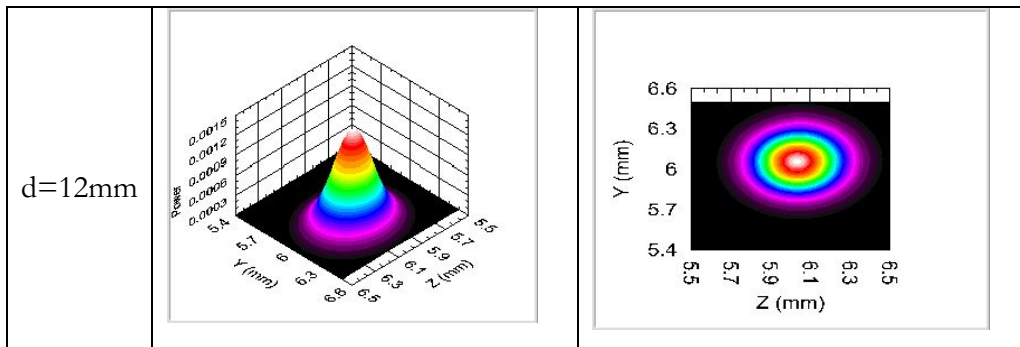
- Esquema Figura 6.1
- Lentes da Lightpath
- $P_i = 2\text{mW}$
- Espaçamento inicial entre lentes = 6.0mm
- Separação entre lentes entre cada ciclo de medição [6.0;12.0]mm, com um passo de 1mm
- Passo de cada ciclo de medição 0.01mm

Os resultados encontram-se na Tabela 6.8

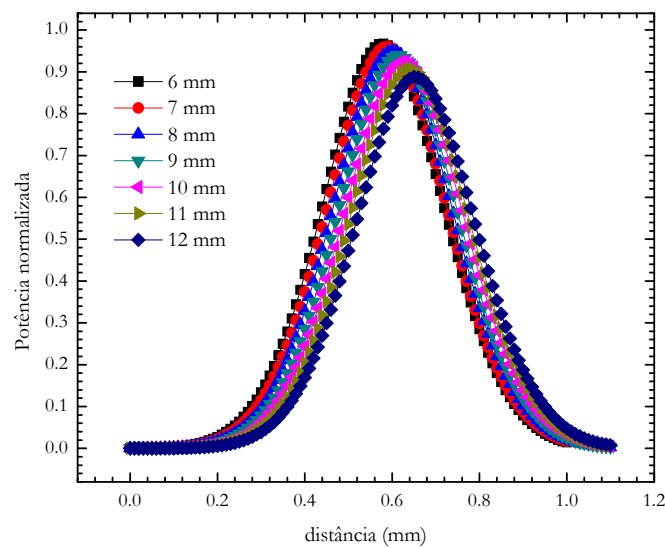
**Tabela 6.8** - Resultados da medição do feixe entre GRIN-GRIN (Lightpath) para diferentes distâncias de separação, após a otimização da potência.

d=6mm		
d=8mm		
d=10mm		



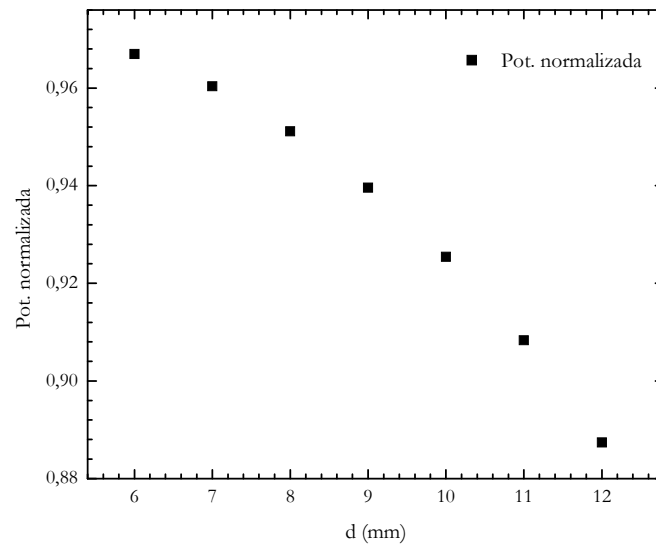


Pela análise dos resultados conclui-se que o comportamento do feixe é idêntico aos resultados das lentes da Thorlabs. Mais uma vez é possível observar um pequeno desvio do feixe e diminuição da potência quando se varia a distância entre lentes, e conforme esperado pela divergência do feixe. A Figura 6.8 mostra, para a potência normalizada, o deslocamento do feixe e a variação da potência.



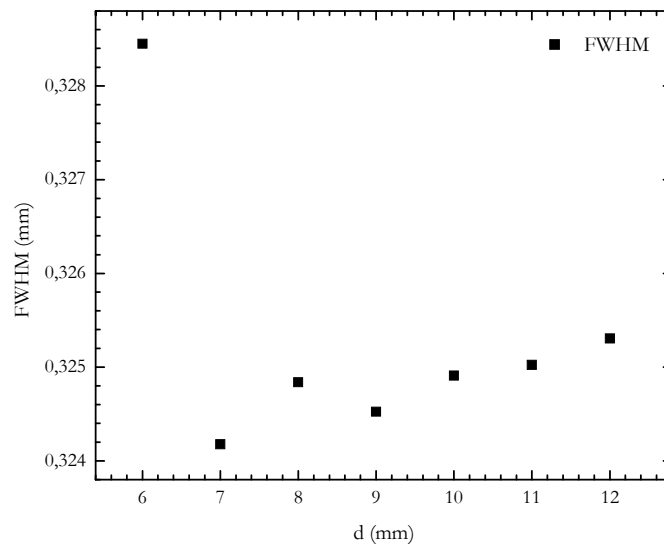
**Figura 6.8** - Representação do feixe para diferentes distâncias entre lentes (Lightpath)

Na Figura 6.9, pode observar-se com mais pormenor a variação da potência com o aumento da distância entre lentes.



**Figura 6.9** - Variação da potência com o aumento da distância entre lentes (Lightpath)

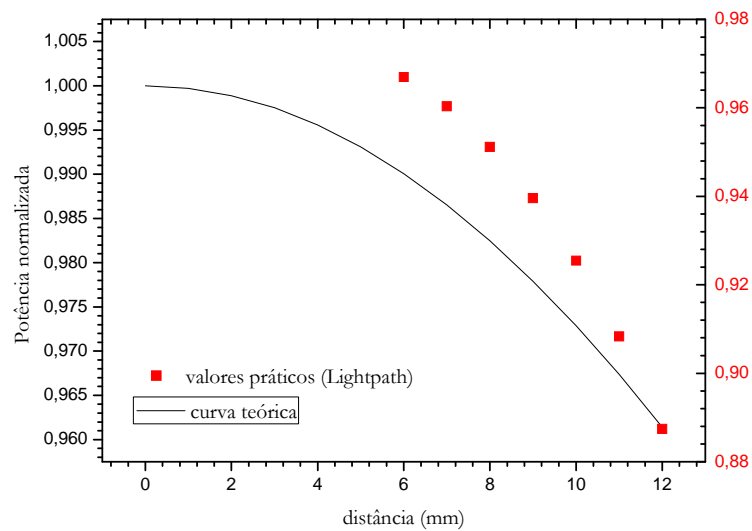
A variação do diâmetro do feixe, calculado na largura máxima a meia altura, FWHM (Full Width Half Maximum), é apresentada na Figura 6.10.



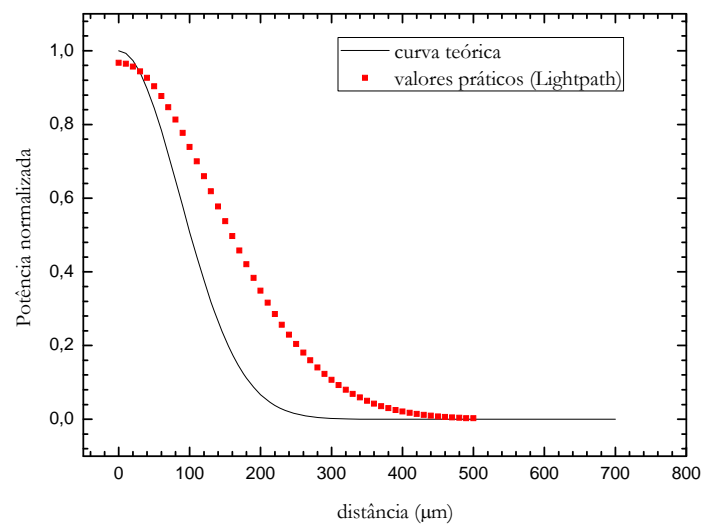
**Figura 6.10** - Variação do diâmetro do feixe vs. separação entre lentes (Lightpath)

Com exceção do primeiro ponto, o resto da variação do diâmetro do feixe comporta-se como o esperado, isto é, aumenta com a variação da distância entre lentes.

A Figura 6.11 representa a comparação feita entre os valores obtidos na medição e a curva teórica. Mais uma vez nota-se uma semelhança no comportamento, as diferenças devem-se às especificidades da construção da lente GRIN. O mesmo se pode dizer em relação à análise realizada para o deslocamento lateral (ver Figura 6.12).



**Figura 6.11** - Perdas introduzidas pela separação entre lentes (Lightpath), comparação com valores teóricos



**Figura 6.12** - Perdas introduzidas pelo deslocamento lateral entre lentes (Lightpath), comparação com valores teóricos

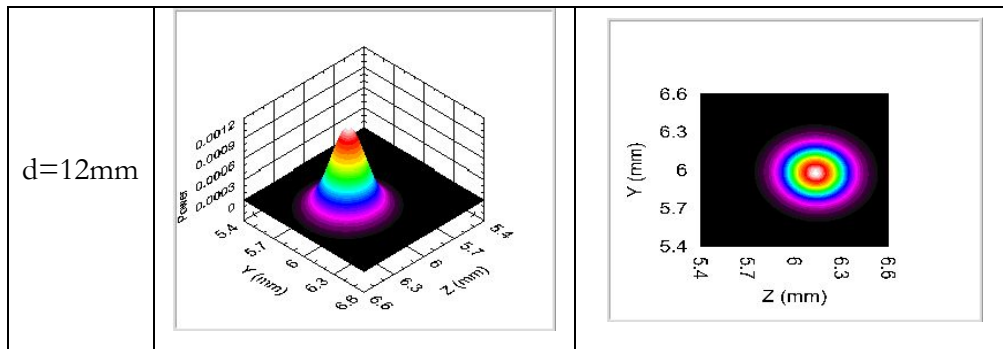
O mesmo procedimento foi repetido para as lentes da NSG. As condições da experiência foram:

- Esquema Figura 6.1
- Lentes da NSG
- $P_i = 2\text{mW}$
- Espaçamento inicial entre lentes = 3.0mm
- Separação entre lentes entre cada ciclos de medição [3.0;12.0]mm, com um passo de 1mm
- Passo de cada ciclo de medição 0.01mm

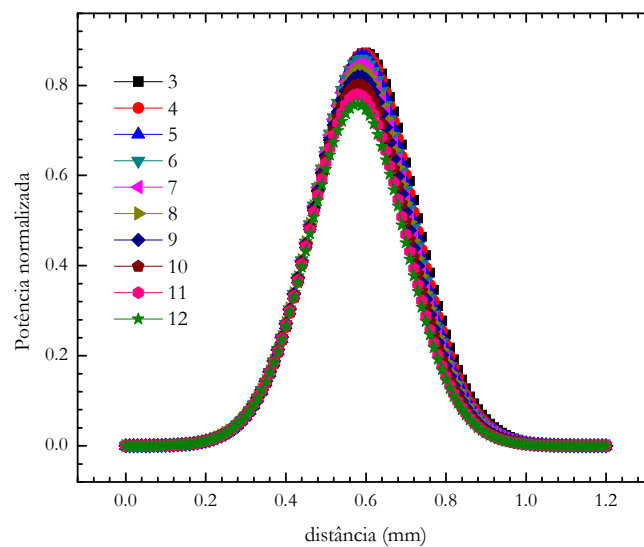
Os resultados encontram-se dispostos na Tabela 6. 9

**Tabela 6. 9** - Resultados da medição do feixe entre GRIN-GRIN (NSG) para diferentes distâncias de separação, após a otimização da potência.

d=3mm		
d=6mm		
d=9mm		

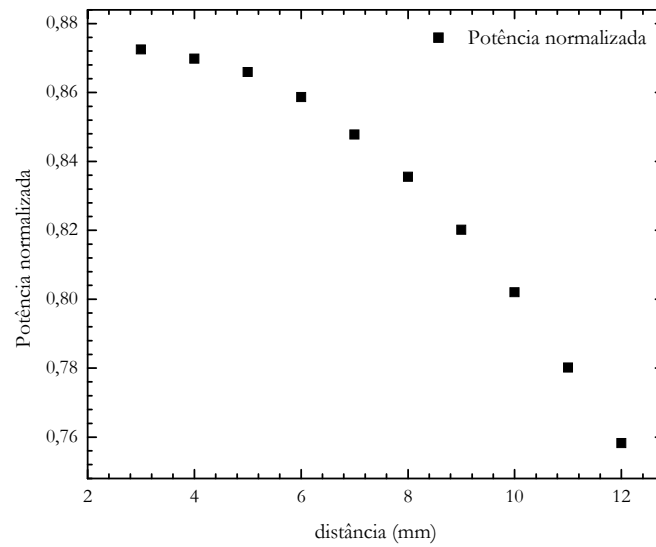


Mais uma vez se verifica pela análise da Figura 6.13, que o alinhamento não é perfeito pois observa-se que o feixe se desloca com a variação da distância entre lentes.



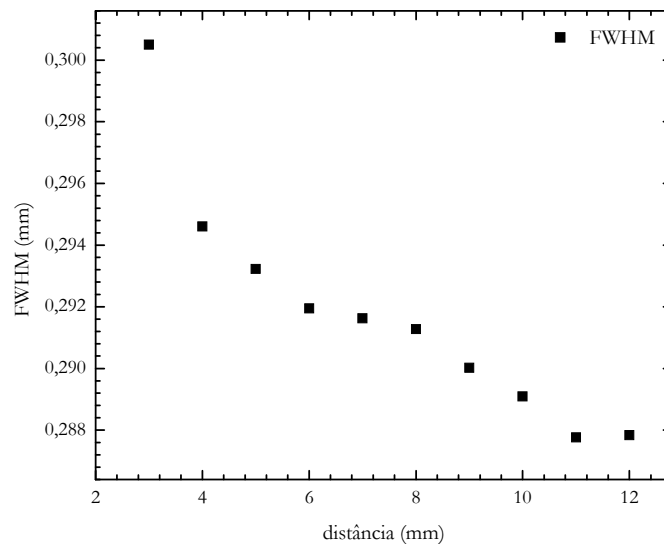
**Figura 6.13** - Representação do feixe para diferentes distâncias entre lentes (NSG)

A Figura 6.14 mostra com maior pormenor a variação da potência consoante a distância de separação entre lentes.

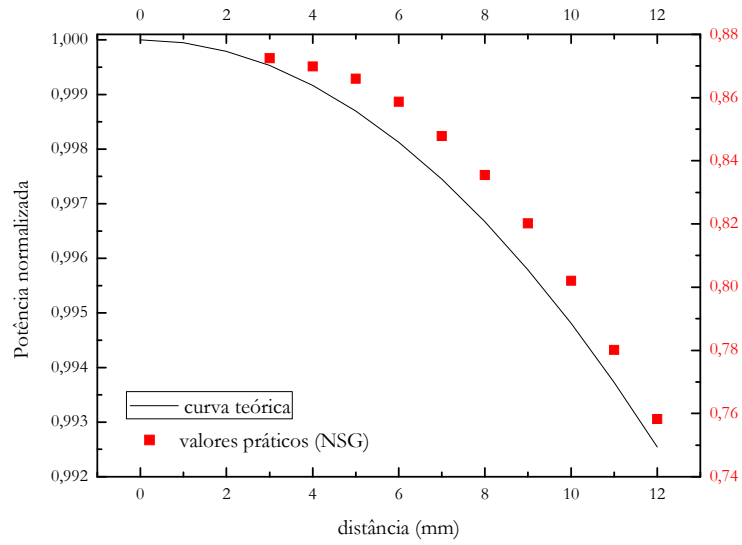


**Figura 6.14** - Variação da potência com o aumento da distância entre lentes (NSG)

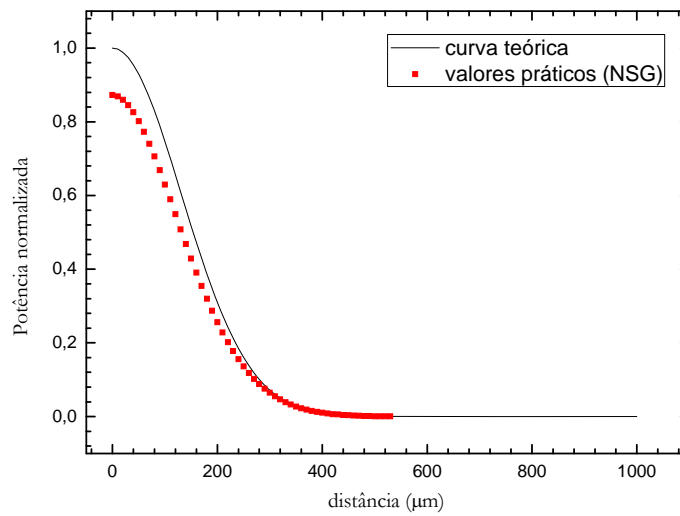
Mais uma vez observa-se uma diminuição do diâmetro do feixe à medida que se aumenta a distância entre as lentes GRIN (ver Figura 6.15). Este resultado não corresponde à dependência esperada, o que evidencia que o *pitch* da lente não é exactamente  $1/4$ .



**Figura 6.15** - Variação do diâmetro do feixe vs. separação entre lentes (NSG)



**Figura 6. 16** - Perdas introduzidas pela separação entre lentes (NSG), comparação com valores teóricos



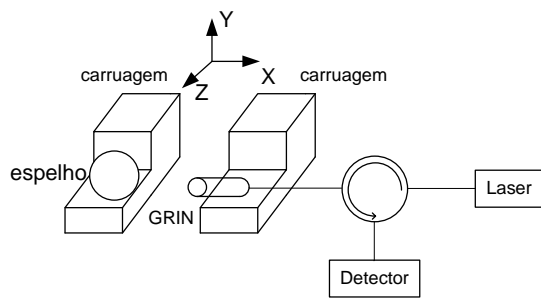
**Figura 6. 17** - Perdas introduzidas pelo deslocamento lateral entre lentes (NSG), comparação com valores teóricos

No caso do deslocamento lateral, verifica-se que a dependência da curva dos resultados experimentais é mais acentuada. Como já referenciado no capítulo teórico sobre as lentes GRIN, os desvios laterais e angulares são os que mais influenciam esta dependência, fazendo com que existam raios que ficam fora do ângulo de aceitação da fibra óptica. Consequentemente o valor das perdas será maior.

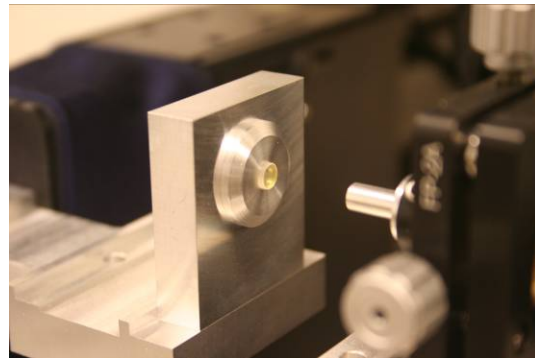
Em ensaios relativos ao desvio angular não foram realizados devido a limitações na montagem mecânica actualmente disponível. Futuramente este problema será resolvido, e os ensaios serão realizados.

### 6.3 Espelho – Lente GRIN

O passo seguinte na construção do filtro Fabry-Pérot com componentes micro-ópticos é o desenvolvimento de pares lente GRIN-espelho plano de elevada reflectividade, que posteriormente constituirão a cavidade do interferómetro. Nesse sentido procedeu-se ao alinhamento entre uma lente grin e um espelho micro-óptico com uma face com um filme anti-reflexivo e a outra com um filme de elevada reflectividade (ver Figura 6.19).



**Figura 6.18** – Esquema de montagem entre espelho e lente GRIN



**Figura 6.19** – Imagem da montagem entre espelho e lente GRIN

Este conjunto, espelho/lente, é um elemento importante no desenvolvimento de um filtro sintonizável, pois vai permitir formar a cavidade. A sensibilidade deste par espelho/lente ao alinhamento é bastante maior, como esperado e verificado pelos resultados experimentais, pois é necessário alinhar a reflexão provocada pelo espelho com a lente GRIN. Este alinhamento foi realizado manualmente, porque ainda não estavam reunidas as condições para se proceder a um alinhamento automático. O procedimento desenvolvido para a realização do alinhamento entre o espelho e a lente GRIN baseia-se no seguinte: num primeiro passo, o feixe emitido pela lente foi centrado com o centro do espelho, de seguida e com a ajuda de um cartão detector de infra-vermelhos foi localizada a reflexão do feixe provocada pelo espelho. Após a localização da reflexão, movimenta-se a carruagem onde o espelho se encontra de modo a centrar o feixe reflectido com a lente GRIN.

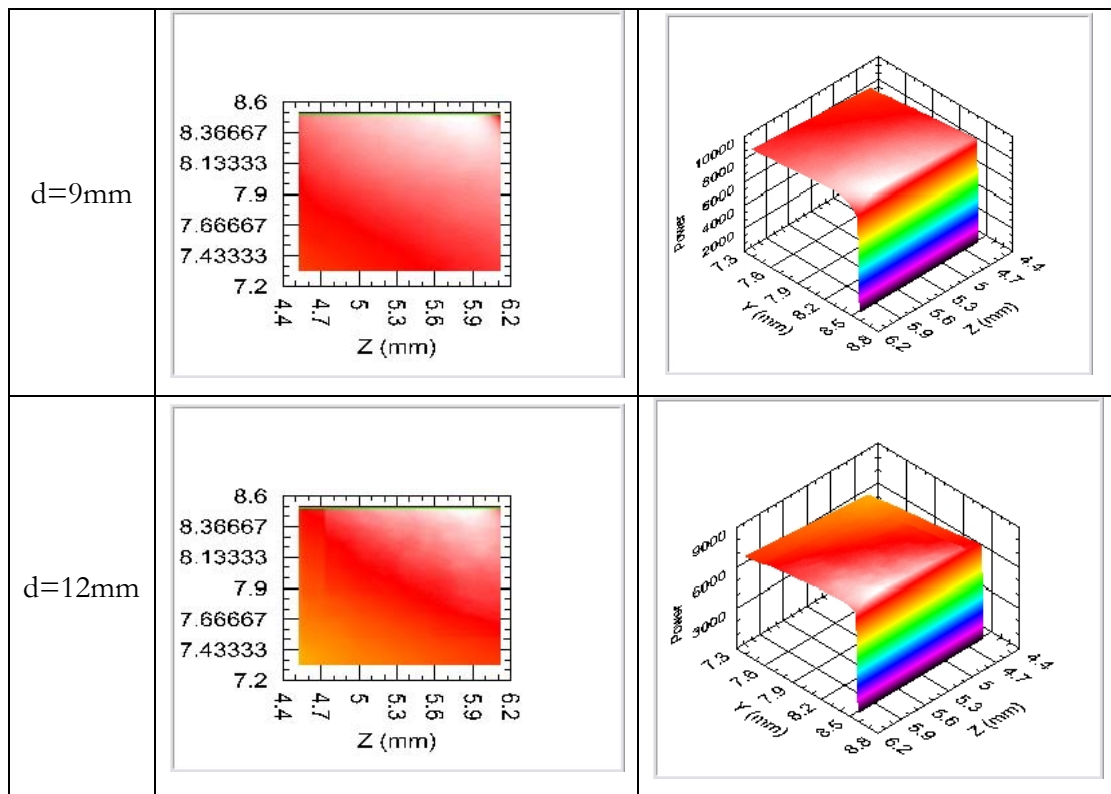


Os primeiros resultados são referentes às lentes da NSG e encontram-se na Tabela 6.10, e os parâmetros do ensaio foram:

- Esquema Figura 6.18
- Lente da NSG
- $P_i = 3\text{mW}$
- Espaçamento inicial entre lente e espelho = 3.0mm
- Separação entre lente-espelho entre cada ciclos de medição [3.0;12.0]mm, com um passo de 1mm
- Passo de cada ciclo de medição 0.02mm

**Tabela 6.10** – Resultados das medições entre espelho e GRIN (NSG) para diferentes distâncias de separação

d=3mm		
d=6mm		

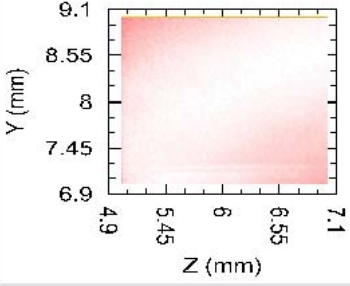
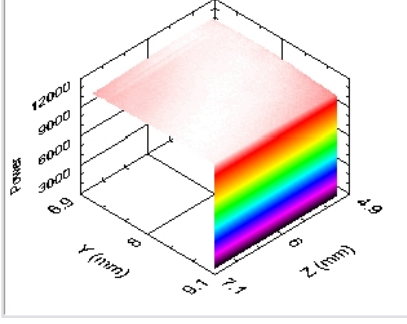
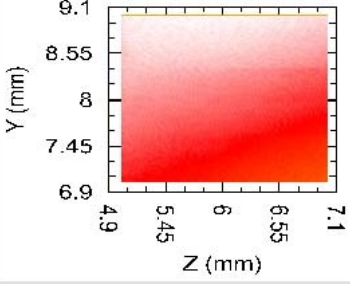
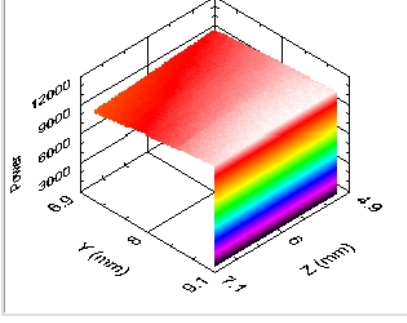
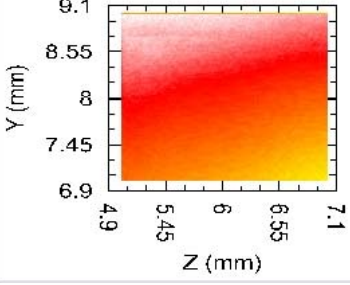
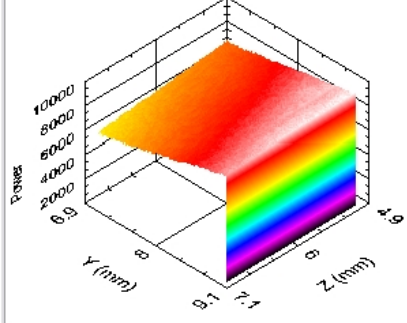
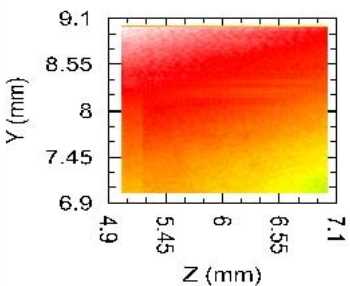
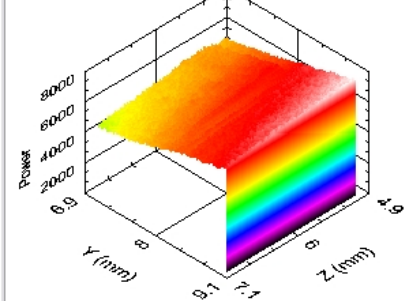


Após este ensaio, repetiu-se a experiência com as lentes da Lightpath, sendo usados os seguintes parâmetros experimentais:

- Esquema Figura 6.18
- Lente da Lightpath
- $P_i = 3\text{mW}$
- Espaçamento inicial entre lente e espelho = 4.5mm
- Separação entre lente-espelho entre cada ciclos de medição [4.5;12.5]mm, com um passo de 1mm
- Passo de cada ciclo de medição 0.02mm

Os resultados podem se observados na Tabela 6.11

**Tabela 6.11** - Resultados das medições entre espelho e GRIN (Lightpath) para diferentes distâncias de separação

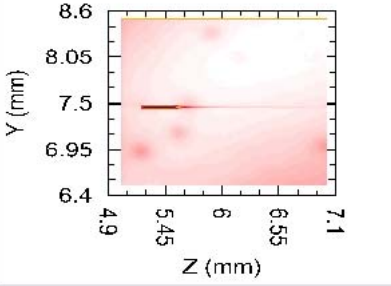
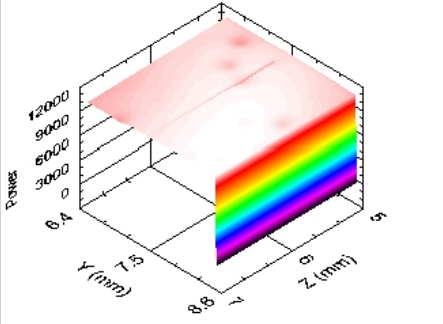
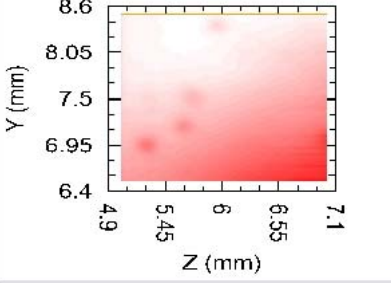
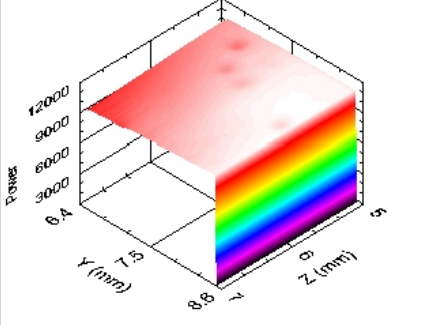
d=4.5mm		
d=7.5mm		
d=10.5mm		
d=12.5mm		

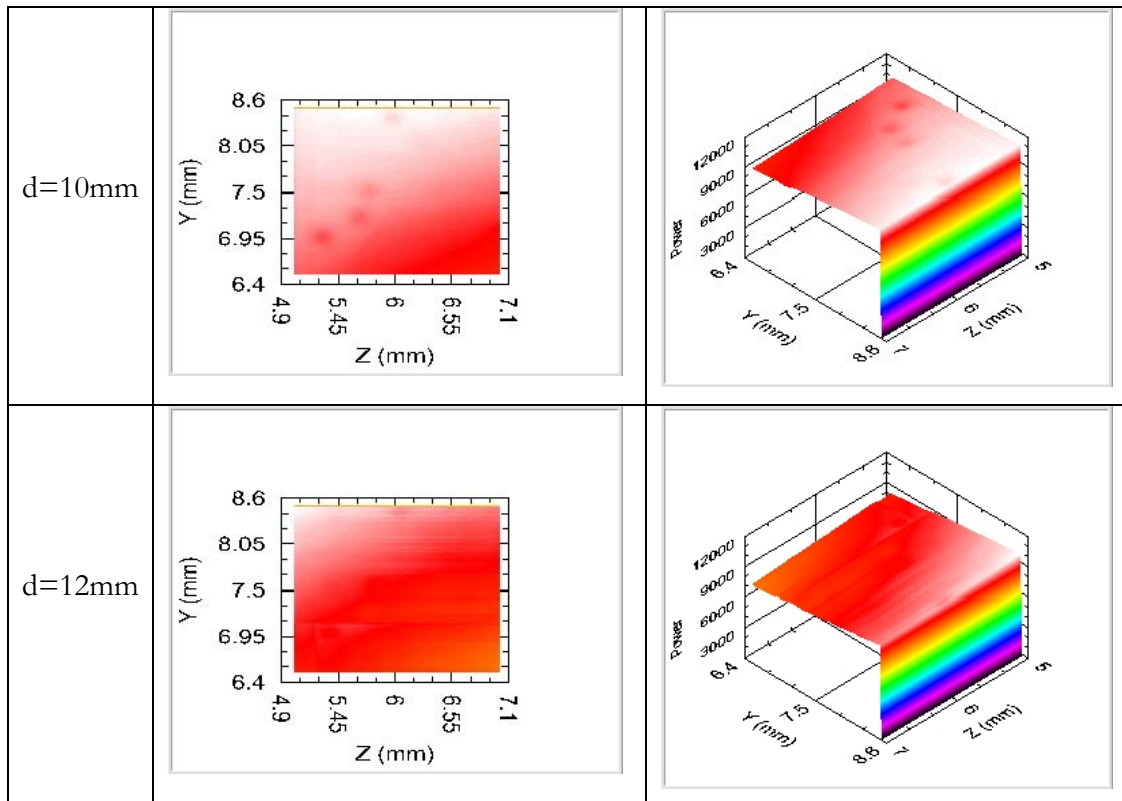
Para finalizar repetiu-se a experiência, mas agora para as lentes da Thorlabs, onde os parâmetros foram os seguintes:

- Esquema Figura 6.18
- Lente da Thorlabs
- $P_i = 3\text{mW}$
- Espaçamento inicial entre lente e espelho = 6.0mm
- Separação entre lente-espelho entre cada ciclos de medição [6.0;12.0]mm, com um passo de 1mm
- Passo de cada ciclo de medição 0.02mm

A Tabela 6.12 mostra os resultados.

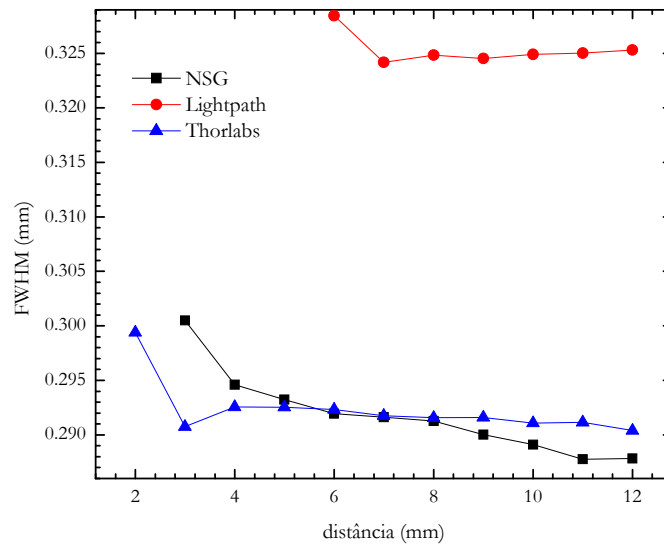
**Tabela 6.12** - Resultados das medições entre espelho e GRIN (Thorlabs) para diferentes distâncias de separação

d=6mm		
d=8mm		

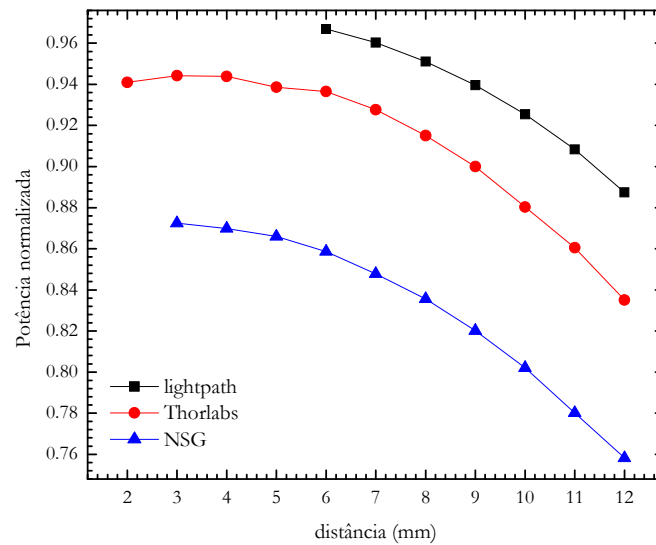


Como se pode observar pelos gráficos da Tabela 6.10, Tabela 6.11 e Tabela 6.12, as zonas mais claras representam as áreas onde a reflexão provocada pelo espelho conseguiu ser captada pela lente GRIN. Como já referido anteriormente o alinhamento deste conjunto espelho/lente é mais sensível a erros de alinhamento, este facto verifica-se através da observação do deslocamento da zona de maior captação por parte da lente quando esta sofre um deslocamento.

De um modo geral, e tendo conhecimento que o alinhamento realizado para todas as lentes testadas não foi ainda otimizado, pode-se afirmar que, mesmo assim, as lentes da Lightpath conduziram ao melhor resultado. A principal vantagem deste modelo é a largura do feixe (ver Figura 6.20), pois permite que o alinhamento seja menos sensível à variação da distância de separação entre a lente e o espelho (ver Figura 6.21).

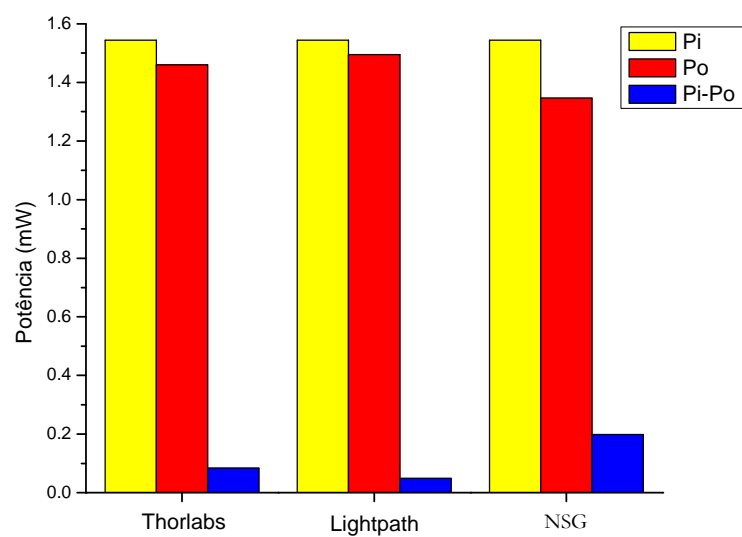


**Figura 6.20** – Comparação do diâmetro do feixe nas várias lentes.



**Figura 6.21** – Comparação da perdas de potência com o aumento da separação entre lentes para todos os modelos de lentes

A Figura 6.22 mostra a potência obtida à saída do sistema para cada lente com a mesma potência de entrada. Os resultados mostram que a lente da Lightpath obtém o melhor resultado, e para um distância inicial maior que as outras lentes (ver Figura 6.21).



**Figura 6.22** – Comparação da relação  $P_i$ - $P_o$  para os modelos de lentes utilizados

O posicionamento das carruagens sobre a mesa óptica foi otimizado de modo a ser possível obter a máxima excursão segundo o eixo dos Z. Este aspecto, e considerando os diferentes tamanhos dos invólucros, teve influência na distância inicial entre lentes.

### 7.1 Optimizações do sistema de alinhamento

Durante a utilização da máquina de visão para efectuar o alinhamento, verificou-se que o posicionamento dos focos de luz não era o ideal, uma vez que, como o material do invólucro das lentes é bastante reflector provoca na imagem um excesso de luminosidade nas orlas laterais, e por vezes na posição central. Este efeito tem um impacto directo no contraste da imagem, pois em vez de se observar a área da lente toda branca e o exterior a negro, existem zonas dentro da área do invólucro a preto causando conflitos de detecção no software desenvolvido e conseqüentemente erros de medição. A solução para este problema passa pela alteração da posição dos focos de luz, colocando-os em contra-luz de frente para as câmaras, deste modo a visualização das orlas de qualquer objecto torna-se muito mais fácil.

Outro aspecto a mudar é a posição do sistema de suporte das câmaras. A posição actual da câmara, que capta a imagem lateral do objecto, não permite que seja feito um deslocamento com a carruagem da *Newport*, modelo ILS250pp (ver Figura 5.5), pois a localização das carruagens de seis eixos sobre a mesa óptima limita este tipo de movimento. A solução encontrada é a passagem para uma posição simétrica relativamente à sua posição actual.

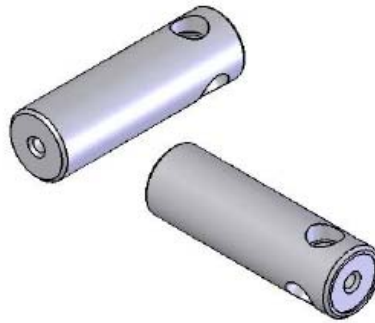
O software desenvolvido até à data pode ser optimizado no sentido de aumentar o nível de automação na execução das tarefas de modo a reduzir o tempo de alinhamento.

### 7.2 Desenvolvimentos futuros

Pretende-se desenvolver um suporte mecânico para as lentes GRIN que permita obter resultados para o desvio angular.

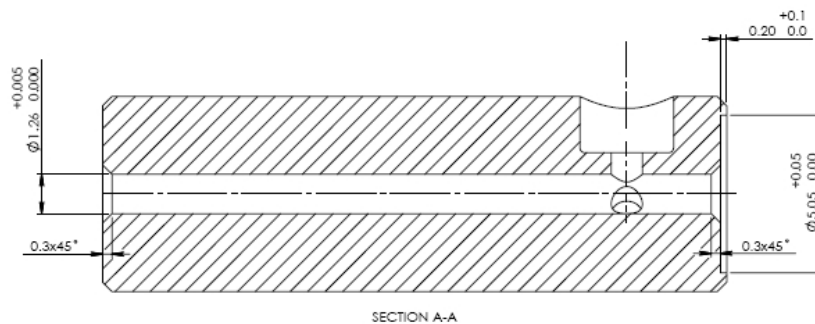
Já se encontra desenvolvido um suporte que permitirá fazer com que o conjunto espelho/lente seja só um elemento a integrar posteriormente no desenvolvimento do filtro Fabry-Pérot. O suporte desenvolvido para este efeito encontra-se na Figura 7.1.



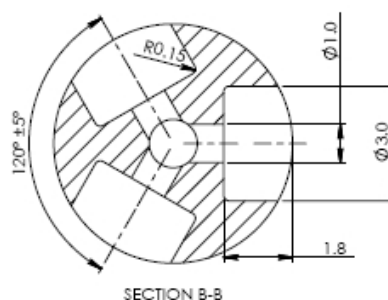


**Figura 7.1** – Suporte desenvolvido para o conjunto espelho/GRIN

A peça desenvolvida foi fabricada de acordo com as dimensões das lentes da Lightpath. A lente será introduzida pela face oposta à qual se irá colocar o espelho, até se posicionar onde se encontram as aberturas superiores, que servirão para a introdução do adesivo para fixação da lente (ver Figura 7.2 e Figura 7.3).



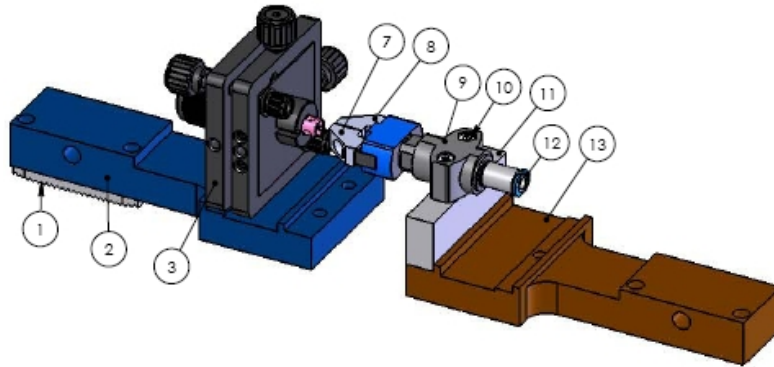
**Figura 7.2** – Esquema do suporte, seção A-A, para o conjunto espelho/GRIN



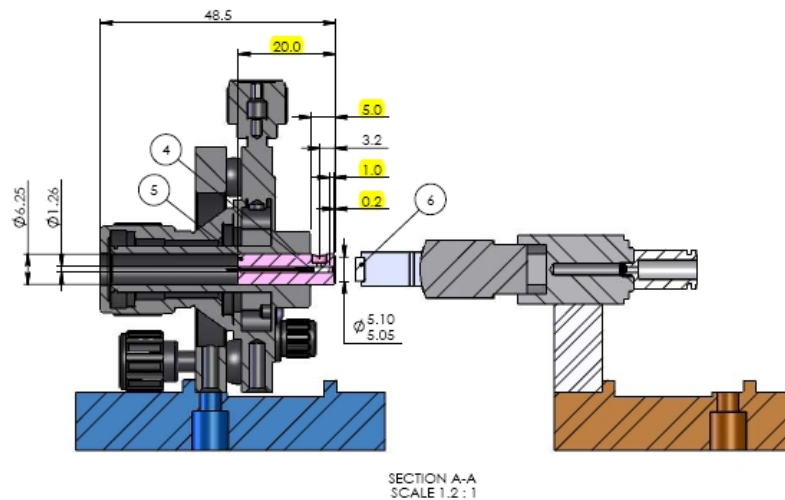
**Figura 7.3** – Esquema do suporte, seção B-B, para o conjunto espelho/GRIN

A colocação do espelho ao suporte será montado de acordo com a Figura 7.4, Figura 7.5 e Figura 7.6. O espelho será colocado no suporte através da ajuda de uma pinça pneumática.

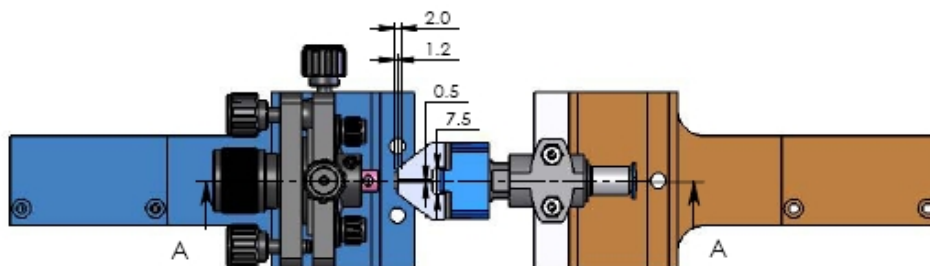
Com a utilização das carruagens de seis eixos será realizado o alinhamento, e após a otimização deste alinhamento o espelho será fixado ao suporte. Esta fixação será executada com controlo em loop fechado de modo a minimizar desalinhamento devido ao processo de cura do adesivo A descrição dos componentes encontra-se na Tabela 7.1.



**Figura 7.4** – Esquema de montagem e alinhamento do espelho ao suporte



**Figura 7.5** – Esquema (vista lateral) de montagem e alinhamento do espelho ao suporte



**Figura 7.6** - Esquema (vista de topo) de montagem e alinhamento do espelho ao suporte

**Tabela 7.1** – Descrição dos componentes do sistema de montagem do conjunto espelho/GRIN

Item	Descrição
1	Base de ligação entre carruagem e suporte
2	Suporte de montagem (esquerdo)
3	Posicionadores de fibra óptica
4	Lente GRN
5	Suporte para o conjunto espelho/GRIN
6	Micro espelho
7	Garra esquerda da pinça
8	Garra direita da pinça
9	Pinça
10	Parafuso
11	Base de montagem da pinça
12	Tomada rápida de ar comprimido
13	Suporte de montagem (direito)

Após a realização de uma rotina de fabricação que permita um alinhamento ótimo e uma boa colagem do conjunto espelho/lente, será desenvolvida uma cavidade Fabry-Pérot, elemento importante para o desenvolvimento de um filtro sintonizável para telecomunicações em redes ópticas.

Por fim, e através do uso do laser para micro-soldadura, o dispositivo final será encapsulado num invólucro do tipo *butterfly* (ver Figura 7.7).

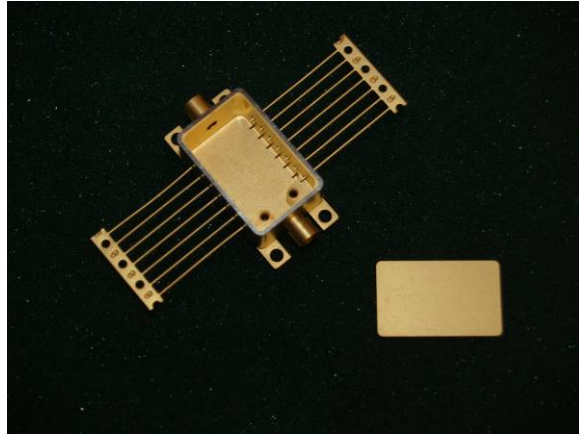


Figura 7.7 – Invólucro do tipo butterfly

A seqüência final de montagem encontra-se descrita na Tabela 7.2

Tabela 7.2 – Sequência final de montagem de um filtro sintonizável

<p>a)</p> A 3D cutaway diagram showing the internal components of the butterfly housing. A central cylindrical component is visible, surrounded by various mechanical parts. The housing is open, and the internal structure is clearly visible.	<p>b)</p> A 3D cutaway diagram showing the housing assembly from a different perspective. The internal components are visible, and the housing is shown in a partially assembled state.
<p>c)</p> A 3D cutaway diagram showing the housing assembly with the central component now fully seated. The housing is shown in a more complete state than in the previous steps.	<p>d)</p> A 3D cutaway diagram showing the final assembly. The housing is now closed, and the internal components are fully enclosed. The external pins and connectors are visible.

Durante estes passos do desenvolvimento, a máquina de alinhamento estará em constante desenvolvimento para que todos os processos de alinhamento e fabricação sejam otimizados, conseguindo assim obter um produto com custo de produção controlado.

### 7.3 Conclusões

Pode afirmar-se que o desenvolvimento da máquina para alinhamento automático de componentes micro-ópticos, cumpriu integralmente os objectivos propostos para o trabalho apresentado. Até à data, todas especificações idealizadas para o desenvolvimento da máquina, como por exemplo, as características da máquina de visão e as carruagens nanométricas que permitem realizar o alinhamento, estão a corresponder ao especificado ao nível do projecto.

Os ensaios realizados com as lentes colimadoras permitiram a escolha do modelo que melhor garantisse, posteriormente, o desenvolvimento de um filtro sintonizável para redes de telecomunicações em fibra óptica. As dimensões da lente GRIN são sem dúvida um dos parâmetros importantes na determinação das dimensões do dispositivo final; no entanto, este trabalho permitiu demonstrar que o diâmetro do feixe colimado é o factor de maior relevância na construção de dispositivos integrados em fibra óptica, pois esta característica torna o sistema menos sensível à separação entre as lentes colimadoras. O alinhamento efectuado com o espelho e as diversas lentes GRIN foi realizado com o objectivo de desenvolver um suporte de fixação de ambos os elementos e automatizar o processo de alinhamento. É de salientar o facto de que, este processo é consideravelmente mais difícil de obter que o simples alinhamento conjunto lente GRIN - lente GRIN.

Como o protótipo se encontra ainda em fase de desenvolvimento, o sistema de alinhamento poderá sofrer alterações no futuro de modo a otimizar ou simplesmente tornar mais adequado à manipulação dos componentes micro-ópticos utilizados. O contínuo desenvolvimento de qualquer sistema é dependente dos problemas e das respectivas soluções encontradas durante a evolução do projecto. Neste sistema já estão previstas algumas alterações de modo a obter um melhor rendimento, desde a posição das câmaras constituintes da máquina de visão até à optimização do software de controlo.

## Referências

---

1. Heyler, K.S.M.a.R. *To Manufacture More, Automate*. 2000 [cited; Available from: <http://www.newport.com/Support/Magazine%5FFeatures/pdf/0600ps.pdf>.
2. Heyler, K.S.M.a.R. *Automated manufacturing systems for high-volume packaging of fiber-optic components*. 2000 [cited; Available from: <http://www.newport.com/Support/Magazine%5FFeatures/pdf/00320-416.pdf>.
3. Heyler, R. *IMPROVING COST, YIELD AND THROUGHPUT*. 2001 [cited; Available from: [http://www.newport.com/Support/Magazine\\_Features/assembly.aspx](http://www.newport.com/Support/Magazine_Features/assembly.aspx).
4. Timothy, P.K., G. Allon, and K.B. Shubham, *Knowledge-based design of optoelectronic packaging and assembly automation*, K.K. George, Editor. 2003, SPIE. p. 283-294.
5. Heyler, R. *Package Design Considerations for Automated Assembly*. 1999 [cited; Available from: <http://www.newport.com/Support/Magazine%5FFeatures/fpn01.aspx>.
6. Bergman, R.H.a.D. *Standards will lead the way to a successful future*. 2002 [cited; Available from: <http://www.newport.com/Support/Magazine%5FFeatures/pdf/20640-208.pdf>.
7. Rossi, D. *yield improvements depend on choosing the right approach*. 2002 [cited; Available from: <http://www.newport.com/Support/Magazine%5FFeatures/pdf/20640-209.pdf>.
8. Kurzweg, T.P., et al., *Model-based optoelectronic packaging automation* *Model-based optoelectronic packaging automation*. Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of, 2004. **10**(3): p. 445-454.
9. Adam, J., et al., *Addressing packaging challenges* *Addressing packaging challenges*. Circuits and Devices Magazine, IEEE, 2002. **18**(4): p. 40-49.
10. Bhat, S.K., et al. *Advanced packaging automation for opto-electronic systems* *Advanced packaging automation for opto-electronic systems*. in *Lightwave Technologies in Instrumentation and Measurement Conference, 2004. Proceedings of the*. 2004.
11. Matthews, M.R., et al., *Optical components-the new challenge in packaging* *Optical components-the new challenge in packaging*. Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, IEEE Transactions on [see also IEEE Trans. on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, Part A, B, C], 1990. **13**(4): p. 798-806.
12. Soon, J. and J. Soon. *Automation manufacturing systems technology for opto-electronic device packaging*. in *Electronic Components and Technology Conference, 2000. 2000 Proceedings. 50th*. 2000.
13. Suhir, E., *Microelectronics and photonics -- the future*. Microelectronics Journal, 2000. **31**(11-12): p. 839-851.
14. Delden, J.S.V., *Optical circulators improve bidirectional fiber systems*, in *Laser Focus World*. 1995.
15. [cited; Available from: <http://www.ofr.com/>.
16. Lipscomb, K.S.M.a.G.F. *Automation Techniques for Optoelectronic Component Production*. 2000 [cited; Available from: <http://www.newport.com/Support/Magazine%5FFeatures/fpn02.aspx>.
17. adamant-kogyo.
18. machinedesign.com.
19. Carlos Gomez-Reino, M.V.P.e.C.B., *Gradient-Index Optics: Fundamentals and Applications*. 2002: Springer.

20. Hecht, E., *Óptica*. 3<sup>a</sup> ed. 2002: Fundação Calouste Gulbenkian.
21. [www.nsgamerica.com](http://www.nsgamerica.com).
22. Yuan, S. and N.A. Riza, *General Formula for Coupling-Loss Characterization of Single-Mode Fiber Collimators by use of Gradient-Index Rod Lenses*. Appl. Opt., 1999. **38**(15): p. 3214-3222.
23. Gilsdorf, R.W. and J.C. Palais, *Single-mode fiber coupling efficiency with graded-index rod lenses*. Appl. Opt., 1994. **33**(16): p. 3440.
24. Yariv, A., *Optical Electronics in Modern Communications*. 5<sup>a</sup> ed. 1997.
25. CVI Using etalons. **Volume**,
26. optics, M., *Advantages of fiber Fabry-Perot Technology*.
27. photonics, P. *Basics Physics and Design of Etalons*. [cited; Available from: <http://www.precisionphotonics.com/>].
28. Rusby, S., *Choosing a Camera and Lens for Machine Vision*, in *Euromphotonics*. 2007.