



Universidade de Aveiro Departamento de Física  
Ano 2018

**José Pedro Silva**  
**Neves Alves Duarte**

**Fibras especiais para amplificadores óticos de  
banda larga**





**José Pedro Silva  
Neves Alves Duarte**

**Fibras especiais para amplificadores óticos de  
banda larga**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Física, realizada sob a orientação científica da Doutora Ana Maria Sousa da Rocha, Investigadora do Instituto de Telecomunicações de Aveiro, Prof. Doutor Mário Fernando dos Santos Ferreira, Professor Associado com Agregação na Universidade de Aveiro e Prof. Doutor Joaquim Fernando Monteiro de Carvalho Pratas Leitão, Professor Auxiliar na Universidade de Aveiro.

Texto com apoio financeiro da FCT/MCTES no âmbito do I3N – UID/CTM/50025/2013, através de fundos nacionais e quando aplicável co-financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional- FEDER (POCI-01-0145-FEDER-007688), no âmbito do Acordo de Parceria COMPETE PT2020 - Programa Operacional Competitividade e Internacionalização.







## **o júri**

presidente

**Prof. Doutor Vítor Brás de Sequeira Amaral**  
Professor Catedrático, Universidade de Aveiro

**Prof. Doutor Paulo Vicente Marques**  
Professor Auxiliar no Departamento de Física e Astronomia da Faculdade de Ciências,  
Universidade do Porto e Investigador do INESC Porto

**Prof. Doutor Mário Fernando dos Santos Ferreira**  
Professor Associado com Agregação, Universidade de Aveiro





## **agradecimentos**

Gostaria de agradecer em primeiro lugar aos meus orientadores, Doutora Ana Maria Rocha, Prof. Doutor Mário Ferreira e Prof. Doutor Joaquim Leitão, pela oportunidade que me concederam de desenvolver esta dissertação na área da ótica, pela sua orientação, disponibilidade e por toda a colaboração e sugestões na revisão deste documento.

Ao Instituto de Telecomunicações de Aveiro pelas condições proporcionadas na realização do trabalho realizado.

Ao *Central Glass & Ceramic Research Institute*, Calcutá, Índia, pela colaboração no projeto de cooperação FCT/Índia "*Development of ultra-broadband (1100-2200 nm) light sources based on modified nano-engineered silica glass optical fibers doped with bismuth and multiple rare-earths toward OCT applications*" que levou a esta dissertação.

A todos os meus colegas e amigos que me acompanharam e apoiaram ao longo do meu percurso académico, em especial à Diana, por tudo o que fez por mim. Um agradecimento muito especial à minha família, em particular à minha Mãe por acreditar sempre em mim e me apoiar incondicionalmente em todos os momentos, especialmente nos mais complicados.



**palavras-chave**

Fibras óticas especiais, amplificadores de fibra dopada, érbio, bismuto, inversão da população, EDFA, saturação, ganho, figura de ruído

**resumo**

O presente trabalho consiste na caracterização de fibras óticas especiais dopadas com vários elementos, entre os quais érbio e bismuto, com vista ao desenvolvimento de amplificadores óticos de banda larga. São igualmente caracterizadas fibras óticas comerciais de características semelhantes que funcionam como termo de comparação.

Pela caracterização da emissão e atenuação das duas fibras em estudo (HPEr-2, dopada com érbio e Bi-7, dopada com bismuto), verificou-se que a fibra HPEr-2 apresenta características adequadas para o desenvolvimento de dispositivos óticos nela baseados. Já a fibra Bi-7 não apresenta tais características e, como tal, foi descartada.

Foram desenvolvidos amplificadores óticos baseados na fibra dopada com érbio caracterizada. O desempenho foi caracterizado, nomeadamente o perfil de ganho, a figura de ruído e comparado com o desempenho do amplificador baseado na fibra comercial I-25.

Verifica-se que a fibra HPEr-2 apresenta um valor de ganho próximo do obtido com a fibra comercial, mas utilizando comprimentos mais curtos, enquanto em relação à figura de ruído, a fibra HPEr-2 apresenta valores de ruído superiores aos obtidos para a fibra I-25.

Verifica-se a viabilidade de desenvolvimento de um amplificador ótico de banda larga baseado na fibra HPEr-2, tendo este um perfil de ganho plano e capacidade de funcionamento com comprimentos de fibra curtos. Apesar destas vantagens, são sugeridas formas de aprofundar este estudo e esclarecer o desempenho de um amplificador deste tipo para outras condições de funcionamento.



**keywords**

Specialty optical fibers, doped fiber optical amplifiers , erbium, bismuth, population inversion, EDFA, saturation, gain, noise figure

**abstract**

The present work consists in the characterization of specialty optical fibers doped with several elements, among them erbium and bismuth, with the purpose of developing broadband optical amplifiers. Commercial optical fibers of similar characteristics that serve as a comparison term are also characterized.

By characterizing the emission and attenuation of the two fibers in study (HPEr-2, doped with erbium and Bi-7, doped with bismuth), it was verified that HPEr-2 fiber presents adequate characteristics for the development of optical devices. However, the Bi-7 fiber does not present such characteristics and, as such, it was discarded.

Optical amplifiers based on the erbium doped fiber have been developed. The performance was characterized, namely the gain profile, the noise figure, and they were compared with the performance of the amplifier based on commercial fiber I-25.

It is verified that the HPEr-2 fiber presents a gain value close to the one obtained with the commercial fiber, but using shorter lengths. In relation to the noise figure, HPEr-2 fiber presents higher noise levels than those obtained for fiber I-25.

It is verified the feasibility of a HPEr-2 fiber-based broadband optical amplifier, having a flat gain profile and working with short fiber lengths. Despite these advantages, was to deepen this study and clarify the performance of such amplifier are suggested for other operating conditions.



# Índice

o júri  
agradecimentos  
resumo  
abstract  
lista de figuras

<b>1. Introdução</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Enquadramento e motivação</b> .....	1
<b>1.2 Objetivos</b> .....	2
<b>1.3 Estrutura da dissertação</b> .....	2
<b>2. Fundamentos Teóricos</b> .....	<b>5</b>
<b>2.1 Fibras óticas especiais</b> .....	5
<b>2.1.1 Fibras dopadas com terras raras</b> .....	6
<b>2.1.2 Métodos de fabrico</b> .....	9
<b>2.1.3 Fibras estudadas</b> .....	9
<b>2.2 Amplificadores óticos</b> .....	11
<b>2.2.1 Amplificadores de fibra dopada (DFA)</b> .....	12
<b>2.2.1.1 Princípios de funcionamento</b> .....	12
<b>2.2.1.2 Configurações de um DFA</b> .....	13
<b>2.2.1.3 Características de desempenho</b> .....	15
<b>3. Caracterização das fibras óticas dopadas</b> .....	<b>17</b>
<b>3.1 Análise de pré-formas</b> .....	17
<b>3.2 Atenuação das fibras</b> .....	18
<b>3.3 Emissão para baixas potências</b> .....	22
<b>3.4 Emissão para potências elevadas</b> .....	30
<b>3.5 Sumário</b> .....	34
<b>4. Análise comparativa do desempenho de DFAs</b> .....	<b>35</b>
<b>4.1 Montagem experimental</b> .....	35
<b>4.2 Dependência do ganho com a potência de bombeamento</b> .....	36
<b>4.3 Dependência do ganho com a potência do sinal de entrada</b> .....	39
<b>4.4 Ganho e figuras de ruído</b> .....	41
<b>4.4 Sumário</b> .....	44
<b>5. Considerações Finais</b> .....	<b>47</b>
<b>5.1 Conclusões</b> .....	47
<b>5.2 Trabalho futuro</b> .....	48
<b>Referências Bibliográficas</b> .....	<b>49</b>





## Lista de Figuras

<b>Figura 2.1</b> – Distribuição dos dopantes da fibra HPEr-2 em relação ao eixo do seu núcleo.....	10
<b>Figura 2.2</b> – Esquema parcial dos níveis de energia e transições entre níveis dos íons de érbio presentes numa fibra ótica quando sujeitos a excitação.....	13
<b>Figura 2.3</b> – Tipos de configuração básicos para o bombeamento de fibras dopadas: (a) Co-propagante; (b) Contra-propagante; (c) Bidirecional.....	14
<b>Figura 3.1</b> – Esquema da montagem experimental utilizada na análise das amostras de pré-formas.....	17
<b>Figura 3.2</b> – Espectros de fotoluminescência medidos utilizando uma potência de excitação de 21.5 mW para as amostras de pré-formas (a) NIMEY-4 e (b) HfBi-4.....	18
<b>Figura 3.3</b> – Esquema da montagem experimental das medidas de atenuação das fibras óticas estudadas.....	18
<b>Figura 3.4</b> - Espectro de atenuação da fibra Bi-7 com um comprimento de 1 m, na gama espectral 600-1700 nm.....	19
<b>Figura 3.5</b> - Espectro de atenuação da fibra HPEr-2 com um comprimento de 1 m, na gama espectral 600-1700 nm.....	20
<b>Figura 3.6</b> - Espectros de atenuação das fibras I-4 (a) e M-5 (b) com um comprimento de 1 m, na gama espectral 600-1700 nm.....	21
<b>Figura 3.7</b> - Espectro de atenuação da fibra I-25 com um comprimento de 1 m, na gama espectral 600-1700 nm.....	21
<b>Figura 3.8</b> – Esquema da montagem experimental utilizada nas medidas de luminescência para uma amostra volúmica.....	22
<b>Figura 3.9</b> – Espectro de emissão de uma amostra volúmica obtido com o monocromador SPEX 1000M e com o espectrómetro FTIR Bruker Vertex 80v, equipado com um detetor de InGaAs.....	23
<b>Figura 3.10</b> – Esquema da montagem experimental utilizada nas medidas de luminescência para as amostras de fibra ótica.....	24
<b>Figura 3.11</b> - Espectros de fotoluminescência medidos para a fibra ótica Bi-7 com vários comprimentos e com uma potência de excitação de 21.5 mW. O comprimento de onda de excitação foi de 532 nm, a abertura das fendas de entrada e de saída no monocromador foi de 400 $\mu\text{m}$ e a tensão aplicada ao detetor de 150 V.....	25
<b>Figura 3.12</b> – Espectro de emissão da amostra de 0.1 m da fibra Bi-7 para várias potências de excitação distribuídas na gama de valores possíveis do laser. O comprimento de onda de excitação foi de 532 nm, a abertura das fendas de entrada e de saída no monocromador foi de 400 $\mu\text{m}$ e a tensão aplicada ao detetor de 150 V.....	25
<b>Figura 3.13</b> – Espectro de emissão da fibra Bi-7, amostra de 0.05 m, com o detetor de Si na gama de comprimentos de onda 600-1000 nm (a) e emissão vermelha da fibra quando excitada pelo laser verde (532 nm) com uma potência de 21.5 mW (b).....	26
<b>Figura 3.14</b> - Espectros de fotoluminescência medidos para vários comprimentos da fibra HPEr-2 com uma potência de excitação de 21.1 mW. O comprimento de onda de excitação foi de 532 nm, com uma abertura das fendas de entrada e de saída no monocromador de 300 $\mu\text{m}$ e uma tensão aplicada no detetor de 100 V.....	27
<b>Figura 3.15</b> - Espectros de fotoluminescência medidos para a fibra ótica HPEr-2 com 0.1 m de comprimento, para várias potências de excitação distribuídas na gama 2.7-22.3 mW. O comprimento de onda de excitação foi de 532 nm, com uma abertura das fendas de entrada e de saída no monocromador de 300 $\mu\text{m}$ e uma tensão aplicada ao detetor de 100 V.....	28
<b>Figura 3.16</b> - Espectros de fotoluminescência medidos para vários comprimentos da fibra I-4 (a) e M-5 (b) com uma potência de excitação de 21.1 mW. O comprimento de onda de excitação foi de 532 nm, com uma abertura das fendas de entrada e de saída no monocromador de 300 $\mu\text{m}$ e uma tensão aplicada no detetor de 100 V.....	29

<b>Figura 3.17</b> - Espectros de fotoluminescência medidos para vários comprimentos da fibra I-25 com uma potência de excitação de 21.1 mW. O comprimento de onda de excitação foi de 532 nm, com uma abertura das fendas de entrada e de saída no monocromador de 300 $\mu\text{m}$ e uma tensão aplicada no detetor de 100 V.....	29
<b>Figura 3.18</b> – Esquema da montagem experimental utilizada na caracterização das fibras óticas para potências elevadas.....	30
<b>Figura 3.19</b> - Espectro de emissão da fibra Bi-7 para vários comprimentos (a) e espectro característico do laser (b) para uma potência de 100 mW.....	31
<b>Figura 3.20</b> - Espectro de emissão da fibra HPER-2 para vários comprimentos, com uma potência de excitação de 100 mW e um comprimento de onda de excitação de 980 nm.....	32
<b>Figura 3.21</b> - Espectro de emissão da fibra HPER-2 para vários comprimentos, com uma potência de excitação de 398 mW e um comprimento de onda de excitação de 980 nm.....	32
<b>Figura 3.22</b> - Espectro de emissão da fibra I-25 para vários comprimentos, com uma potência de excitação de 100 mW e um comprimento de onda de excitação de 980 nm.....	33
<b>Figura 3.23</b> - Espectro de emissão da fibra I-25 para vários comprimentos, com uma potência de excitação de 398 mW e um comprimento de onda de excitação de 980 nm.....	34
<b>Figura 4.1</b> – Esquema da montagem experimental utilizada na caracterização dos amplificadores óticos.....	35
<b>Figura 4.2</b> – Variação do ganho em função da potência de bombeamento para vários comprimentos das fibras HPER-2 (a) e I-25 (b), usando um sinal de entrada de -25 dBm, com um comprimento de onda de 1550 nm.....	37
<b>Figura 4.3</b> – Variação do ganho em função da potência de bombeamento para as fibras HPER-2 (a) e I-25 (b) de 1 m, usando um sinal de entrada de 1550 nm, com potências de -25 e 0 dBm.....	37
<b>Figura 4.4</b> – Variação do ganho em função da potência de bombeamento para vários comprimentos das fibras HPER-2 (a) e I-25 (b), usando um sinal de entrada de -25 dBm, com um comprimento de onda de 1590 nm.....	38
<b>Figura 4.5</b> – Variação do ganho em função da potência de bombeamento para as fibras HPER-2 (a) e I-25 (b) de 1.5 m, usando um sinal de entrada de 1590 nm, com potências de -25 e 0 dBm.....	39
<b>Figura 4.6</b> – Variação do ganho em função da potência do sinal de entrada para vários comprimentos das fibras HPER-2 (a) e I-25 (b), usando uma potência de bombeamento de 100 mW, com um comprimento de onda de 1550 nm.....	40
<b>Figura 4.7</b> – Variação do ganho em função da potência do sinal de entrada para vários comprimentos das fibras HPER-2 (a) e I-25 (b), usando uma potência de bombeamento de 100 mW, com um comprimento de onda de 1590 nm.....	41
<b>Figura 4.8</b> – Perfil de ganho (a) e figura de ruído (b) da fibra HPER-2 para vários comprimentos de onda do sinal de entrada e vários comprimentos de fibra, usando uma potência de bombeamento de 100 mW e uma potência de sinal de entrada de -25 dBm.....	42
<b>Figura 4.9</b> – Perfil de ganho (a) e figura de ruído (b) da fibra I-25 para vários comprimentos de onda do sinal de entrada e vários comprimentos de fibra, usando uma potência de bombeamento de 100 mW e uma potência de sinal de entrada de -25 dBm.....	43
<b>Figura 4.10</b> – Comparação entre o perfil de ganho (a) e figura de ruído (b) das fibras HPER-2 e I-25 com 1 e 1.5 m, respectivamente, usando uma potência de bombeamento de 100 mW e uma potência de sinal de entrada de -25 dBm.....	44

# 1. Introdução

## 1.1 Enquadramento e motivação

Nos últimos anos, mais concretamente desde o final do século XX, os sistemas de comunicação por fibra ótica passaram a dominar os sistemas de transmissão de informação e têm sofrido um desenvolvimento significativo. Os amplificadores óticos desempenham um papel importante no desenvolvimento destes sistemas. Inicialmente, a regeneração do sinal de transmissão ao longo da fibra era feita com recurso a repetidores optoeletrónicos de sinal, situados periodicamente ao longo da rede de comunicação, que funcionavam fazendo a conversão do sinal ótico degradado para sinal elétrico, regenerando-o nesse domínio antes de o converter novamente para o domínio ótico. Este processo era pouco eficiente, dispendioso uma vez que o espaçamento entre cada repetidor era de poucos quilómetros e limitava o funcionamento do sistema a uma única frequência [1]. O aparecimento em 1989 da técnica de multiplexação por divisão de comprimento de onda (WDM) permitiu melhorar o desempenho dos sistemas de comunicação graças ao uso de vários comprimentos de onda em simultâneo aumentando o volume de dados que era possível transmitir. Isto levou à necessidade de conseguir compensar as perdas de sinal nas fibras óticas de forma mais eficiente. É aqui que surgem os amplificadores óticos que funcionam exclusivamente no domínio ótico. O sinal é simplesmente amplificado óticamente à medida que percorre o amplificador, não estando assim limitado a uma largura de banda do sinal de transmissão [2]. A mudança dos regeneradores para os amplificadores óticos permitiu um aumento significativo na capacidade dos sistemas de transmissão de dados.

Os amplificadores óticos mais utilizados são os amplificadores de fibra dopada com érbio (EDFA), que funcionam sobretudo na banda C (1530-1565 nm) correspondente à banda mais utilizada nos sistemas de comunicação ótica. Os primeiros amplificadores de fibra ótica dopada foram desenvolvidos em simultâneo em 1987 na Universidade de Southampton e nos laboratórios AT&T Bell [3], utilizando lasers de árgon que operavam nos 650 e 514 nm respetivamente. Estes dispositivos evoluíram rapidamente ao longo dos anos, sendo atualmente utilizados na esmagadora maioria dos sistemas de transmissão.

O bom desempenho dos sistemas de comunicação ótica despertou cada vez maior interesse e estes continuaram em grande desenvolvimento no início do século XXI. Assim, com o atual aumento de informação transmitida, a banda C está a atingir a saturação, sendo, por isso, necessário o alargamento da banda de transmissão utilizada como forma de resposta às necessidades da demanda por tráfego de telecomunicações. Passou então a ser necessário utilizar, além da banda C, outras bandas de transmissão como as bandas S (1460-1530 nm) e L (1565-1625 nm) para transmitir informação, o que levou a que fossem concentrados esforços em desenvolver amplificadores óticos eficientes numa banda larga do espectro ótico que fossem capazes de produzir amplificação nestas bandas.

Uma das opções é alargar a banda de amplificação dos amplificadores de fibra dopada utilizando fibras óticas dopadas com diferentes elementos além do érbio. Estes elementos podem funcionar sozinhos ou em conjunto com o érbio de forma a melhorar o desempenho dos amplificadores e diminuir o custo dos mesmos. Vários elementos foram considerados para este propósito como o óxido de alumínio, o telúrio, o túlio, o itérbio ou o bismuto [4]. Alguns destes elementos demonstram emissões numa banda mais larga do que a obtida com o érbio (por exemplo o bismuto), podendo ser considerados para amplificadores em sistemas WDM, enquanto outros funcionam melhor em conjunto com o érbio (como o itérbio ou o telúrio), permitindo a utilização de concentrações elevadas

deste sem a ocorrência de fenómenos indesejados, como a formação de aglomerados ou o fenómeno de *quenching* [5] [6], representando um ganho semelhante num dispositivo mais compacto e uma banda de amplificação alargada em relação aos EDFAs convencionais.

Apesar de todos estes avanços, os amplificadores de fibra dopada ainda podem evoluir e o seu desempenho ser otimizado e melhorado. Deste modo, ao longo desta dissertação são caracterizadas fibras especiais dopadas com vários elementos em conjunto com o érbio e com o bismuto com vista à sua utilização em amplificadores de fibra dopada de banda larga.

## 1.2 Objetivos

O presente trabalho surge com dois objetivos primordiais. Em primeiro lugar, pretende-se realizar o estudo e caracterização de fibras óticas especiais dopadas com diferentes elementos, entre os quais o érbio e o bismuto. Além das fibras que nos foram fornecidas serão também caracterizadas fibras comerciais dopadas com érbio, de forma a estabelecer uma comparação entre a fibra HPER-2 e o que já existe no mercado. Esta comparação não é realizada para a fibra Bi-7 uma vez que não havia nenhuma fibra com características semelhantes disponível. A caracterização das fibras basear-se-á na compreensão das capacidades destas em termos de emissão, quando sujeitas a várias potências de excitação e para vários comprimentos de fibra. Será também analisada a atenuação de cada uma das fibras numa região muito larga do espectro ótico.

Pretende-se também realizar a implementação e caracterização de amplificadores óticos baseados nestas fibras. O objetivo destes amplificadores passa por conseguir uma região de operação bastante alargada em comparação com o que já existe, por exemplo, com os EDFAs convencionais.

A caracterização dos amplificadores consistirá na otimização dos parâmetros fundamentais ao seu funcionamento, como o comprimento ótimo de fibra ou os valores das potências de bombeamento e do sinal de entrada. Serão também avaliados o perfil de ganho e as figuras de ruído de forma a avaliar o desempenho de cada amplificador.

O desempenho do amplificador baseado na fibra HPER-2 será comparado com um amplificador baseado numa fibra comercial, de forma a avaliar quais as suas vantagens e desvantagens.

## 1.3 Estrutura da dissertação

Esta dissertação é dividida em cinco capítulos onde serão caracterizadas as fibras que nos foram fornecidas. Através da análise dos resultados da caracterização avançou-se para a montagem de um amplificador ótico baseado na fibra dopada com érbio. Este foi caracterizado e comparado com um amplificador baseado numa fibra comercial dopada com érbio.

Neste capítulo é realizado o enquadramento deste trabalho no estado da arte e em relação ao projeto de parceria onde se insere. São clarificados os objetivos do trabalho e é descrita a estrutura do mesmo.

No segundo capítulo são apresentados os princípios de funcionamento de três tipos de amplificadores óticos assim como é feita uma comparação entre todos avaliando as vantagens e desvantagens de cada um e a sua melhor aplicação no mercado atual.

No capítulo três, é feita a caracterização das fibras que nos foram fornecidas, assim como de três fibras comerciais com diferentes concentrações de érbio, em termos de atenuação e emissão recorrendo a várias potências e comprimentos de onda de excitação. São apresentadas algumas conclusões obtidas na análise destes resultados que justificam a progressão do trabalho.

O quarto capítulo foca-se na caracterização e avaliação do desempenho de dois amplificadores de fibra dopada com érbio. Um deles é baseado na fibra que nos foi fornecida e o outro baseado numa

fibra comercial. Os resultados de ambos são comparados de forma a perceber as vantagens e desvantagens do amplificador baseado na fibra caracterizar.

No quinto capítulo são apresentadas as conclusões retiradas deste trabalho, assim como algumas sugestões de trabalho futuro que visam dar sequência a este projeto.



## 2. Fundamentos Teóricos

Neste capítulo é realizada uma revisão dos vários tipos de fibras óticas especiais existentes e das suas aplicações, focando sobretudo nas fibras óticas dopadas com terras raras. É apresentada uma perspectiva histórica da evolução deste tipo de fibras, assim como dos métodos utilizados no seu fabrico. São também apresentadas as fibras a caracterizar ao longo deste trabalho, fazendo referência a algumas das suas características.

São abordados os fundamentos teóricos essenciais à compreensão do funcionamento de amplificadores óticos, com especial atenção aos amplificadores de fibra dopada. Estes fundamentos são a base do estudo realizado neste trabalho, onde será analisada a influência de parâmetros como as potências de bombeamento, a potência dos sinais à entrada e o comprimento de fibra dopada no desempenho dos amplificadores de fibra dopada, em particular, em termos do seu perfil de ganho e figura de ruído. São ainda discutidas as diferentes configurações em que é possível utilizar os amplificadores de fibra dopada, enumerando as aplicações em que cada uma é usada.

### 2.1 Fibras óticas especiais

A rápida evolução dos métodos de fabrico e das capacidades das fibras óticas assim como os desempenhos obtidos por esta tecnologia abriram a possibilidade de explorar todas as possibilidades que as fibras oferecem. Variando as propriedades das fibras óticas, estas podem ser utilizadas numa vasta gama de aplicações e não apenas como meio de transmissão. As alterações às fibras convencionais que levem diferentes características tornam as fibras especiais. Atualmente existem vários tipos de fibras especiais que são utilizadas em diversas aplicações graças às vantagens que apresentam. Um exemplo de fibras especiais são as fibras óticas de plástico (POF). Estas fibras são constituídas por polímeros em vez do vidro que constituí as fibras convencionais, sendo muito utilizadas na indústria automóvel devido à sua flexibilidade e custo reduzido.

Outro tipo de fibra muito utilizada em sistemas de comunicação é a fibra de dispersão deslocada (*dispersion-shifted fibers*). Este tipo de fibras são utilizadas com o objetivo de fazer coincidir a zona de menor dispersão das fibras de vidro, tipicamente situada nos 1300 nm, com a janela de menor atenuação, tipicamente situada nos 1550 nm, através de alterações ao índice de refração do núcleo e da bainha, conduzindo a um melhor desempenho destas fibras, sobretudo em sistemas de comunicação WDM [7].

Outro tipo de fibras especiais, possivelmente as mais utilizadas atualmente, são as fibras óticas dopadas. Este tipo de fibras é utilizado sobretudo no fabrico de dispositivos óticos, como por exemplo amplificadores. Inicialmente, estes dispositivos utilizavam sobretudo o érbio como dopante do núcleo das fibras devido à sua emissão situada na região dos 1520-1570 nm, que corresponde à região de menor atenuação das fibras óticas. Mas, esta região rapidamente deixou de ser suficiente para responder às necessidades dos sistemas de comunicação, levando ao estudo de outros iões com emissão noutros comprimentos de onda que pudessem servir como dopantes. Foram então surgindo fibras dopadas com outras terras raras capazes de melhorar vários parâmetros de desempenho destes dispositivos, além de alargarem a região espectral que era possível explorar [4] [8]. Procurou-se também estudar outros elementos além das terras raras, havendo um grande interesse sobretudo em fibras óticas dopadas com bismuto, graças ao trabalho de Fujimoto e Nakatsuka [9], que verificaram emissão luminescente centrada nos 1300 nm, com bandas bastante largas (entre 200-300 nm) em vidros dopados com bismuto [10]. As primeiras fibras dopadas com bismuto foram produzidas por Dvoyrin *et al.* [11] e Haruna *et al.* [12] em 2005.

Outro exemplo de fibras óticas especiais que tem ganho especial atenção nos anos recentes são as fibras óticas microestruturadas. Este tipo de fibras surgiu em 1996, graças ao trabalho de Russel *et al.* [13], que demonstrou o funcionamento deste tipo de fibras. A partir daí estas começaram a ser estudadas em maior detalhe, levando ao aparecimento de fibras com matrizes de centenas de buracos de ar ao longo do comprimento da fibra [14]. Estas são obtidas através da manipulação da estrutura da própria fibra ao invés de alterações no índice de refração. Isto é, a fibra é constituída apenas por um material, geralmente sílica, sem qualquer dopagem, sendo a luz guiada por estes buracos de ar dispostos ao longo da fibra devido à diferença entre os índices de refração do ar e da sílica. Estes buracos são geralmente dispostos em padrões regulares, apesar de existirem alguns tipos de fibra onde é feito uso de padrões não periódicos. A microestruturação das fibras óticas levou a avanços em várias áreas que fazem uso desta tecnologia, tirando partido das capacidades físicas proporcionadas pela distribuição e localização dos buracos de ar no perfil das fibras. Uma das características de maior interesse deste tipo de fibra é a capacidade de confinar luz numa área de secção transversal muito pequena, através do elevado contraste entre os índices de refração do ar presente nos buracos e do vidro. As fibras que fazem uso desta propriedade são denominadas por fibras microestruturadas altamente não-lineares (HNL-MOFs). Existem também fibras que fazem uso da propriedade inversa, designadas por fibras de área modal larga (LMA-MOFs) que espalham a luz por áreas de secção mais largas de forma a evitar limitações causadas por não-linearidades quando usadas potências de sinal muito elevadas, algo que é impossível de realizar em fibras óticas convencionais. Além destas características, a microestruturação de fibras óticas oferece outras possibilidades que ainda não estão suficientemente desenvolvidas. Uma das mais interessantes passa pela possibilidade de obtenção de aberturas numéricas muito elevadas que, combinada com outros parâmetros que é necessário estudar e otimizar pode levar a avanços significativos na área de lasers de fibra ótica de alta potência [15].

### 2.1.1 Fibras dopadas com terras raras

O constante aumento do volume de dados nas redes de comunicação levou à necessidade de alargar a região do espectro utilizada nestes sistemas além da gama oferecida pelos iões de terras raras. Foi então necessário considerar outros elementos como possíveis dopantes para a criação de dispositivos com bandas de funcionamento o mais largas possível. Como referido nas secções anteriores, o érbio é o dopante mais utilizado em amplificadores de fibra dopada. Contudo, quase todas as terras raras têm potencial de funcionar em dispositivos deste género, ou até em lasers de fibra ótica. Cada ião de terra rara tem as suas vantagens e desvantagens, assim como aplicações diferentes necessitam de certas características de forma a otimizar o desempenho, quer seja ganho ou potência a diferentes comprimentos de onda ou outro tipo de atributos. Os níveis de energia dos iões de terras raras são semelhantes entre si e bem definidos. Assim, o desafio para utilizar outros iões passa por encontrar vidros adequados em termos de índice de refração, transparência, solubilidade de terras raras e ausência de absorções parasíticas (processo de absorção ótica que não dá origem a um par elétron-buraco [16]), entre outros fatores, que possam servir de base para fibras dopadas com estes iões.

Há um desejo de conseguir criar amplificadores de banda muito larga que sejam capazes de substituir os amplificadores eletrónicos usados em redes mais antigas. Para isto são considerados vários iões de terras raras e até outros elementos que possam servir de dopantes, sendo principalmente considerados para este propósito o itérbio, o neodímio, o praseodímio e o túlio.

As potencialidades do itérbio como ião dopante em fibras óticas foram reconhecidas em 1990 por Hanna *et al.* [17]. Estas incluíam uma banda de ganho larga capaz de operar dos 975 aos 1180 nm [18], algo que foi aproveitado sobretudo para a criação de lasers de fibra ótica dopada com



este ião. Outro aspeto muito positivo relativamente a este ião é a sua banda de absorção que vai dos 900 aos 980 nm, cobrindo assim comprimentos de onda onde díodos laser de alta potência funcionam melhor. Além disto, a nível espectroscópico, o itérbio apresenta um tempo de vida de 1 ms num estado metastável e uma estrutura de níveis de energia de apenas dois níveis 4f, que facilita o armazenamento de energia e permite o uso de dopagens de elevada concentração. Tal como em outras terras raras, a geometria das fibras óticas permite um ganho elevado e uma alta eficiência [19].

Além de dispositivos em fibra ótica que utilizam o itérbio como dopante único, é também prática comum utilizar fibras de núcleo co-dopado com érbio e itérbio como forma de melhorar o desempenho dos dispositivos. Nestes casos, a luz de bombeamento é absorvida pelos iões de itérbio e subsequentemente os iões de érbio são excitados diretamente pela transferência de energia dos iões de itérbio. Isto permite o uso de díodos laser de alta potência na gama de 910-980 nm, ao invés de haver o condicionamento a apenas um comprimento de onda como acontece em fibras dopadas apenas com érbio. Em simultâneo, graças à elevada concentração de iões de itérbio que é possível utilizar, é obtido um coeficiente de absorção da luz de bombeamento superior, melhorando a eficiência da transferência de energia enquanto se mantém uma razão entre o núcleo e a bainha da fibra bastante baixa [20]. Todos estes parâmetros representam vantagens essenciais quando se opera em regimes de alta potência.

Fibras óticas dopadas com neodímio foram muito cedo consideradas como uma forte possibilidade no fabrico de amplificadores na região dos 1300 nm. Infelizmente, este ião é afetado por problemas relativos ao vidro da fibra o que impediu a obtenção de ganhos elevados para comprimentos de onda de interesse, apesar de este poder ser bombeado com um comprimento de onda na região dos 800 nm, onde existem vários díodos laser de alta potência. Ainda assim, o estudo deste ião levou a descobertas importantes no campo dos amplificadores de fibra dopada. O neodímio, devido à estrutura dos seus níveis de energia acaba por ver a transição de interesse (nos 1300 nm) sobreposta com uma transição situada nos 1060 nm que parte do mesmo nível de energia e é quatro vezes mais intensa, o que acaba por diminuir o ganho obtido para os 1300 nm. Além disto o tempo de vida dos iões de neodímio no estado excitado é também ordens de grandeza inferior ao que se obtém com iões de érbio [2]. Ainda assim, recentemente foi obtida amplificação significativa na região dos 1427 nm, utilizando uma fibra ótica dopada com neodímio [21] abrindo a porta a mais estudos sobre este ião e à possibilidade de ser possível utilizá-lo em aplicações no futuro.

O uso de praseodímio num sistema de amplificação foi proposto em 1989 [22], contudo as primeiras observações de ganho de fibras dopadas com praseodímio para comprimentos de onda de 1300 nm apenas surgiram em 1991 [23]. O desenvolvimento, na altura, de novas fibras com aberturas numéricas largas, fibras com menores atenuações levou a que fosse possível obter um ganho assinalável (30 dB) e uma boa eficiência em regime de sinal de entrada baixo com este ião. O perfil de ganho de um amplificador de praseodímio é também interessante, com uma largura de banda de 30 nm, centrado nos 1300 nm. Em 1992, foi demonstrado o funcionamento de um amplificador de potência com potência de saída saturada para um comprimento de onda de 1300 nm por investigadores dos laboratórios BT (*Bell Telephone*). Neste mesmo estudo, foi também reconhecido que, apesar de uma eficiência em regime de *small-signal*, a eficiência de conversão de potência em regime de saturação para o amplificador de praseodímio estava próxima do que era possível obter para um amplificador de fibra dopada com érbio [24]. Daqui em diante, os amplificadores de praseodímio foram muito testados em vários parâmetros importantes, em especial em relação ao ruído. Foi confirmado que a figura de ruído de amplificadores que utilizam fibras dopadas com este ião não apresenta degradação significativa à medida que se aproximam/atingem o regime de saturação [25], provando serem um boa escolha para aplicações como amplificadores de potência onde é necessário um baixo ruído para potências elevadas.

Em 1982, Antipenko *et al.* propuseram o túlio como um ião dopante de fibras óticas, uma vez que este ião apresenta uma transição em torno dos 1470 nm, uma região onde ainda não existia

qualquer amplificador capaz de funcionar [26]. Contudo, não foi dada muita relevância a este ião, uma vez que apresentava dois problemas fulcrais na realização de amplificação ótica eficiente nessa região. O primeiro prendia-se com a impossibilidade de usar fibras de sílica, dificultando desde logo o fabrico de fibras dopadas com este elemento. O segundo era relativo ao tempo de vida dos iões no estado excitado de maior energia, que era muito inferior ao tempo do estado de menor energia (sistema de quatro níveis). Significa isto que a inversão da população era muito difícil de obter através de bombeamento direto (usando comprimentos de onda de 670 ou 790 nm) [27].

O primeiro problema foi resolvido através da evolução da tecnologia de fabrico de fibras baseadas em vidros fluoretos com baixa atenuação. Este tipo de vidro tem características mais condizentes com as necessidades do túlio e permite a obtenção de melhores resultados. Para a resolução do segundo problema, existem foram estudadas três soluções principais. A primeira passa por utilizar outra transição do ião, com uma emissão na região dos 1800-1900 nm [27]. Outra possível solução passa por diminuir o tempo de vida do estado excitado de menor energia através da co-dopagem da fibra com iões de túlio e de hólmio [28]. Estas duas opções utilizam fontes de bombeamento de 670 ou 790 nm. Mas para a terceira possível solução, é necessário utilizar bombeamento a 1064 nm, para excitar os iões de túlio para um nível de energia muito superior ao realizado nas técnicas anteriores. Para isto, é necessário inserir itérbio como co-dopante na fibra para ajudar na transferência de energia, uma vez que os iões de túlio não apresentam absorção para os 1064 nm [29].

Surgiu recentemente a expectativa de conseguir alargar a banda de amplificação com dispositivos baseados em fibras óticas dopadas com bismuto. O estudo intensivo deste elemento começou com artigos relativos à luminescência de vidros dopados com bismuto na região do infravermelho próximo (1100-1700 nm), que mostraram emissão luminescente nos 1300 nm [9]. Esta luminescência de tempo de vida elevado era obtida através da excitação das bandas de absorção nos 500, 700, 800 e 1000 nm. Em 2005 foram desenvolvidas e estudadas as primeiras fibras óticas baseadas em vidros dopados com bismuto [30], sendo mais tarde estabelecida a primeira gama de operação de um laser de fibra dopada com bismuto entre os 1140 e os 1300 nm [31], entretanto expandida até aos 1500 nm [32]. Além desta gama de funcionamento alargada que torna dispositivos que utilizem fibras dopadas com este elemento muito atrativos. Foi também reportada uma largura a meia altura de ~200 nm e um tempo de vida radiativo elevado (1 ms). Apesar disto, a natureza desta luminescência ainda não é totalmente clara sendo um tópico de grande interesse e discussão na literatura, existindo portanto uma clara necessidade de aprofundar o conhecimento sobre este tipo de fibras.

Outra possibilidade considerada para melhorar o desempenho dos amplificadores óticos de fibra dopada e alargar a sua banda de funcionamento passa pela dopagem do núcleo da fibra com diversos elementos em simultâneo. Estas fibras co-dopadas apresentam várias valências com impacto no desempenho do amplificador, seja pela banda de emissão mais larga que determinado elemento apresente, seja pela facilidade em utilizar grandes concentrações de, por exemplo, érbio sem o aparecimento de aglomerados ou sem o risco de reduzir a população de iões no estado excitado (em inglês *quenching* [6]), permitindo o fabrico de amplificadores mais compactos e com uma gama de funcionamento mais larga. Vários elementos podem ser utilizados em simultâneo com o érbio como por exemplo o óxido de alumínio que permite a utilização de concentrações elevadas de érbio se a formação de aglomerados e ao mesmo tempo alarga a emissão dos iões de terras raras [33]. O zircónio tem uma função semelhante, permitindo usar concentrações elevadas de érbio de forma a obter amplificadores mais compactos devido ao ganho obtido com comprimentos de fibra menores. Outro elemento bastante utilizado é o ítrio, que confere uma grande resistência ao vidro das fibras, impedindo a formação de fraturas [8]. O desafio na utilização deste tipo de fibras passa sobretudo por perceber quais as melhores combinações de elementos de modo a que a relação entre a emissão

e a atenuação seja eficiente, otimizando as concentrações de cada íon e garantindo que o desempenho dos amplificadores consegue responder às necessidades atuais.

### 2.1.2 Métodos de fabrico

O fabrico de fibras óticas dopadas de alta qualidade é crucial no desempenho de um amplificador ótico de fibra dopada. Os métodos utilizados para isto são adaptações de três técnicas comuns de fabrico de fibras óticas convencionais denominadas por deposição de vapor químico modificado (MCVD), deposição axial de vapor e haste no tubo (*rod-in-tube*) [34].

O método MCVD sem a introdução de qualquer dopante (além do estritamente necessário ao funcionamento da fibra, por exemplo o germânio), consiste num fluxo de gases a percorrer um tubo de sílica em rotação lenta, que está sujeito a uma chama que atinge temperaturas de 1500 °C. Os gases reagem na região da chama formando um depósito de vidro no interior das paredes do tubo. A chama percorre todo o comprimento do tubo de forma a garantir a formação de depósito uniforme em todas as zonas deste. Ao realizar este percurso várias vezes é possível criar várias camadas de depósito. As primeiras camadas depositadas vão corresponder à bainha da fibra e requerem um fluxo gasoso de  $\text{SiCl}_4$ ,  $\text{POCl}_3$  e  $\text{CCl}_2\text{F}_2$ . As camadas interiores são constituídas por  $\text{POCl}_3$ ,  $\text{SiCl}_4$  e  $\text{GeCl}_4$  e irão corresponder ao núcleo da fibra. Uma vez completa a reação a bainha fica composta por  $\text{SiO}_2/\text{P}_2\text{O}_5/\text{F}$  e o núcleo por  $\text{SiO}_2/\text{P}_2\text{O}_5/\text{GeO}_2$ . A adição de  $\text{GeO}_2$  serve simplesmente para aumentar o índice de refração do núcleo da fibra. De seguida, o tubo com as camadas de depósito é sujeito a temperaturas de 2000 °C para compactar a pré-forma da fibra. Esta consiste num tubo com a mesma distribuição do índice de refração que a fibra na sua forma final. Esta pré-forma é depois estirada, formando a fibra ótica no seu estado final.

O método de incorporação de dopantes (terras raras) por solução em fibras de sílica foi demonstrado pela primeira vez por Stone e Burrus [35] e discutido por Townsend *et al.* [36] e Ainslie *et al.* [37]. Neste método, a bainha é depositada como uma camada vítrea, como descrito acima, sendo depois utilizada uma temperatura mais baixa (1000 °C) para depositar uma camada de, por exemplo,  $\text{GeO}_2/\text{SiO}_2$ , que representa um material poroso. O tubo é depois mergulhado numa solução onde estão presentes os dopantes pretendidos durante algumas horas, de forma a permitir que os íons penetrem a região do núcleo através dos poros introduzidos pelo  $\text{GeO}_2/\text{SiO}_2$ . Seguidamente é necessário secar e oxidar o tubo com um fluxo de  $\text{Cl}_2/\text{He}/\text{O}_2$ . Finalmente, a pré-forma é esticada tal como feito numa fibra convencional.

Outra técnica muito utilizada é a deposição axial de vapor (VAD). Esta consiste numa pré-forma porosa criada pela deposição de uma camada fina de partículas do vidro pretendido num tubo denominado “semente”. Estas são dispostas axialmente ao longo de todo o tubo. As partículas do vidro são sintetizadas numa chama de um bico de oxigénio-hidrogénio. A semente é de seguida desidratada numa atmosfera de  $\text{SOCl}_2$ , aquecida a 1500 °C formando uma pré-forma porosa. Esta é imersa numa solução com os dopantes pretendidos, tal como realizado na técnica de MCVD e a partir daqui passa pelos mesmos processos até ser obtida a fibra [38].

A técnica *rod-in-tube* é a mais simples de perceber. Consiste simplesmente num tubo de vidro com um vidro de índice de refração elevado. Este é envolto por outro tubo de um vidro com índice de refração inferior, formando uma pré-forma que pode ser esticada para formar a fibra. É necessário garantir que ambos os vidros têm o mesmo coeficiente de expansão térmica de forma a garantir uma boa interface entre as regiões do núcleo e da bainha [39].

### 2.1.3 Fibras estudadas

Ao longo desta dissertação foram caracterizadas várias fibras óticas dopadas, com o intuito de utilizar estas fibras, dopadas com vários elementos, como base para amplificadores óticos capazes

de operar numa região larga do espectro eletromagnético. Duas destas foram fornecidas pelo *Central Glass & Ceramic Research Institute*, Calcutá, Índia, no âmbito de um projeto de colaboração com a Universidade de Aveiro. A informação fornecida pelo fabricante sobre as fibras fornecidas é apresentada na tabela 2.1.

Fibra	Composição do núcleo	Abertura numérica	Diâmetro do núcleo (µm)
HPEr-2	Si-Al-Ge-Y-Ba-Zr-Er	0.30	15.0
Bi-7	Si-Al-Y-Bi	0.18	6.0

Tabela 2.1 - Identificação, composição do núcleo, abertura numérica e diâmetro do núcleo das amostras estudadas.

Foi também fornecida alguma informação relativa ao processo de fabrico da fibra HPEr-2, assim como a distribuição dos dopantes ao longo do núcleo desta. Esta distribuição é apresentada na figura 2.1 onde se vê a percentagem de concentração de cada dopante presente na fibra e qual a sua distância ao eixo da mesma. Este estudo foi realizado através de microanálise por sonda de eletrões. O método de fabrico desta fibra é dividido em dois passos principais: fabrico da pré-forma e estiramento da fibra a partir desta. Para o fabrico da pré-forma, foi utilizada a técnica de MCVD (*Modified Chemical Vapour Deposition*) que incorpora os dopantes com a sílica em que a fibra se baseia. É obtido um tubo de vidro que é de seguida aquecido (a 2000°C) e esticado de forma controlada para garantir que toda a fibra é uniforme nas suas dimensões.

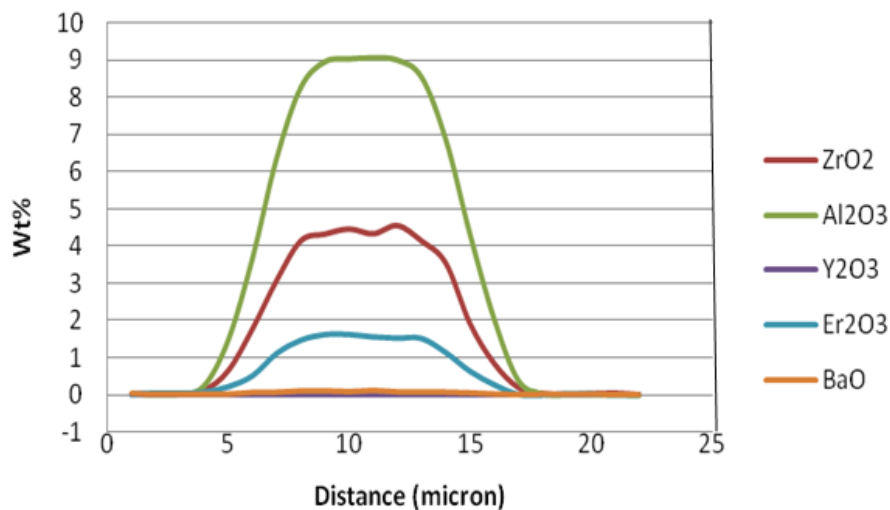


Figura 2.1 – Distribuição dos dopantes da fibra HPEr-2 em relação ao eixo do seu núcleo.

Não foi fornecida a informação relativa à distribuição de dopantes da fibra Bi-7.

Além das fibras óticas, foram também fornecidas pelo mesmo instituto várias amostras de pré-formas com o núcleo dopado com vários elementos. A informação sobre a composição do núcleo destas amostras, fornecida pelo fabricante é apresentada na tabela 2.2.

Designação da amostra	Composição do núcleo
HfBiTm	Hf-Bi-Tm-Al-Y-P
NIMEY-4	Er-Yb-Al-P-Ge
HfBi-4	Hf-Bi-Al-Y
NTm-7	Tm-Y-Al-Ge

Cr-19	Cr-Al-Y-Ca
-------	------------

Tabela 2.2 – Identificação e composição do núcleo das amostras de pré-formas analisadas.

## 2.2 Amplificadores óticos

Em sistemas de comunicação de fibra ótica de longo curso o principal fator limitador da transmissão do sinal é a atenuação inerente às próprias fibras utilizadas, causando a degradação do sinal que se propaga na fibra. A primeira solução encontrada para resolver este problema foi a introdução de um dispositivo eletrónico no sistema que amplifica-se o sinal transmitido, permitindo que este chegasse mais longe no sistema de comunicação. Este dispositivo era um repetidor, um dispositivo capaz de produzir uma amplificação com baixo ruído mas que se apresentava como um dispositivo muito complexo e dispendioso. Um repetidor produz amplificação no domínio elétrico, sendo portanto necessário converter o sinal ótico que está a ser transmitido em sinal elétrico a ser amplificado. O sinal elétrico é também processado de forma a remover os efeitos da dispersão e diminuir o ruído. Este é depois convertido novamente ao domínio ótico e é retransmitido na fibra ótica. Esta necessidade de conversão do sinal complica muito a eletrónica do dispositivo, aumentando o custo deste, e é um processo pouco eficiente.

O elevado custo que os repetidores acrescentavam aos sistemas de transmissão levou à procura de outras soluções mais económicas e que funcionassem apenas no domínio ótico. É aqui que surgem os amplificadores óticos. Estes dispositivos são insensíveis às taxas de transmissão e ao formato da modulação do sinal e, como tal, conferem uma grande flexibilidade aos sistemas de comunicação permitindo a sua atualização sem necessidade de substituir os amplificadores [40]. O aparecimento destes dispositivos revolucionou os sistemas de comunicação ótica de longa distância e são atualmente parte integrante das redes óticas instaladas.

Existem três tipos principais de amplificadores óticos: amplificadores óticos semicondutores, amplificadores de Raman e amplificadores de fibra dopada. Os amplificadores semicondutores surgiram nos anos 60, altura em que foi inventado o laser semicondutor, os quais eram baseados em arseneto de gálio (GaAs) e operavam a temperaturas baixas. No final da década de 80 surgiram os primeiros SOA a operar em comprimentos de onda de 1300 e 1550 nm, fruto de estudos realizados sobre InP/InGaAsP [41]. Este tipo de amplificador é bastante utilizado sobretudo pelo baixo custo que representa e pela sua fácil integrabilidade e versatilidade, contudo, comparando com outros tipos de amplificadores não apresentam os melhores resultados ao nível do ganho e da razão sinal-ruído e são mais afetados por efeitos não lineares [42]. Os amplificadores Raman baseiam-se num efeito não linear designado por espalhamento de Raman estimulado. Este fenómeno consiste num espalhamento inelástico onde a frequência da radiação incidente é alterada através da interação com as vibrações do meio. Estes amplificadores permitem ganho em qualquer comprimento de onda, desde que o comprimento de onda da bomba de Raman esteja sincronizado com o comprimento de onda do sinal a ser transmitido, sendo esta a sua grande vantagem em conjunto com o desempenho destes ao nível do ruído quando comparados com os EDFAs.

Os amplificadores de fibra dopada baseiam-se em iões, sobretudo de terras raras, que atuam como dopantes no núcleo da fibra em uso, tendo como princípio de operação a emissão estimulada. Os amplificadores de fibra dopada mais utilizados são os EDFAs, uma vez que a emissão do érbio está situada na terceira janela de comunicação (1550 nm) onde a atenuação da fibra é mínima. Além disto, os EDFAs apresentam um bom desempenho, com ganho elevado e baixa figura de ruído, sendo também fáceis de integrar em qualquer sistema de comunicação por fibra ótica [40]. Este tipo de amplificadores é discutido em maior detalhe nas secções seguintes.

## 2.2.1 Amplificadores de fibra dopada (DFA)

Os amplificadores de fibra dopada são baseados na dopagem da fibra ótica com iões de terras raras uniformemente distribuídos no seu núcleo, sendo estes iões responsáveis pela amplificação. As propriedades de amplificação da fibra dependem do ião dopante em questão. As primeiras experiências com lasers de fibras óticas dopadas com iões de terras raras foram realizadas em 1964, contudo, esta tecnologia apenas se afirmou no mercado das comunicações óticas anos mais tarde [43]. As fibras podem ser dopadas com iões de vários elementos consoante a aplicação pretendida, mas, atualmente a dopagem mais utilizada é com recurso a iões de érbio (EDFA). O érbio permite obter amplificação de sinal na banda C (1530-1570 nm) [44] que se apresenta como a região preferencialmente usada nas comunicações óticas atuais. Mais recentemente e devido à necessidade de transmissão de um elevado volume de dados foram também estudadas fibras dopadas com érbio com capacidade de amplificação noutras bandas, como por exemplo na banda L (1570-1610 nm). Além disto, foram também estudados outros dopantes além das terras raras, como por exemplo o bismuto, assim como combinações de vários dopantes, com vista a alargar a região de funcionamento destes dispositivos.

### 2.2.1.1 Princípios de funcionamento

Os amplificadores de fibra dopada funcionam todos com base nos mesmos princípios seja qual for o dopante utilizado. Assim, olhando em particular para o exemplo do érbio, procura-se compreender os princípios básicos de funcionamento de um amplificador deste tipo.

A configuração eletrónica do érbio é dada por  $[Xe]6s^24f^{12}$ , onde  $[Xe]$  representa a configuração do átomo de xénon que inclui as subcamadas preenchidas 5s e 5p. A ionização do érbio, como nas outras terras raras, ocorre formando um estado trivalente em que são removidos dois eletrões da camada 6s e um eletrão da camada 4f, mantendo intactas as camadas 5s e 5p. Assim, os eletrões da camada 4f ficam blindados de potenciais perturbações externas e, conseqüentemente, campos elétricos externos têm pouca interferência nas transições 4f-4f [45]. As transições eletrónicas de um ião isolado são bem definidas, no entanto quando o ião é incorporado numa matriz de um material amorfo, como é o vidro, ocorre o alargamento dos níveis de energia levando a que haja emissão numa banda de comprimentos de onda [46].

Nos amplificadores de fibra dopada o sinal é amplificado através da emissão estimulada. Este processo consiste numa fonte de bombeamento a fornecer energia ao meio de amplificação que permite a transição de iões do estado fundamental ( $^4I_{15/2}$ ) para um dos estados excitados,  $^4I_{11/2}$  ou  $^4I_{13/2}$  consoante o comprimento de onda de bombeamento [47], promovendo a inversão da população. Quando os fotões do sinal de transmissão incidem no meio de amplificação, ocorre o decaimento dos iões no estado excitado para o estado fundamental. Este decaimento é acompanhado pela emissão de fotões caracterizados pela mesma fase, direção, frequência e polarização dos fotões incidentes. Este processo é repetido ao longo da fibra amplificando a potência do sinal de transmissão e é designado por emissão estimulada. Para além desta, também se verifica emissão espontânea ao longo da fibra. Os iões de érbio presentes na fibra ótica que são excitados para o estado excitado de maior energia,  $^4I_{11/2}$ , têm um tempo médio de vida limitado neste estado (1  $\mu$ s) [2], e, quando este tempo é ultrapassado sem interação de um fotão externo, os iões decaem espontaneamente para o estado fundamental. Os fotões emitidos desta forma não apresentam características de coerência iguais às dos fotões do sinal que se pretende amplificar, e, ao serem propagados em simultâneo com este dão origem a um fenómeno designado por emissão espontânea amplificada (ASE), que representa a principal causa de ruído neste tipo de amplificadores [44].

Para que o amplificador seja capaz de desempenhar a sua função, é necessário que o sinal de bombeamento utilizado tenha um comprimento de onda coincidente com as bandas de absorção do érbio. Estes valores são de 520, 590, 660, 800, 980 e 1480 nm, [45] sendo os comprimentos de onda tipicamente utilizados os de 980 e 1480 nm [47]. Isto porque bombeamento nestes comprimentos de onda proporciona uma elevada eficiência de amplificação, ou seja, uma boa relação entre o ganho obtido e a potência de bombeamento usada.

Na figura 2.2 é apresentado um diagrama (parcial) dos níveis de energia e transições entre níveis dos iões de érbio quando excitados pelos comprimentos de onda de 980 e 1480 nm. Como é possível observar na figura 2.2, existem diferenças em utilizar comprimentos de onda de bombeamento diferentes. No caso de um comprimento de onda de 980 nm, a absorção de fótons por parte dos iões de érbio leva a que estes sejam excitados para o nível  ${}^4I_{11/2}$  ( $N_3$ ), que apresenta um tempo médio de vida de 1  $\mu$ s. A tendência do sistema é regressar ao seu estado inicial, ou seja, os iões que foram excitados tendem a perder energia e regressar ao nível fundamental  ${}^4I_{15/2}$  ( $N_1$ ). Contudo, antes de regressarem ao nível fundamental, grande parte dos iões decai não radiativamente para o nível metastável  ${}^4I_{13/2}$  ( $N_2$ ), que tem um tempo médio de vida na ordem dos ms. Assim, para potências de bombeamento suficientemente elevadas, a população de iões no nível  ${}^4I_{13/2}$  é superior à população do nível  ${}^4I_{15/2}$ , ocorrendo a inversão de população necessária para a amplificação. As transições de  $N_2$  para  $N_1$  são radiativas e os fótons resultantes têm comprimentos de onda situados em torno dos 1530 nm [47]. No caso de o bombeamento ser feito utilizando um comprimento de onda de 1480 nm, o processo é mais direto, uma vez que os iões de érbio são excitados para o nível  $N_2$  decaindo depois para o nível fundamental.

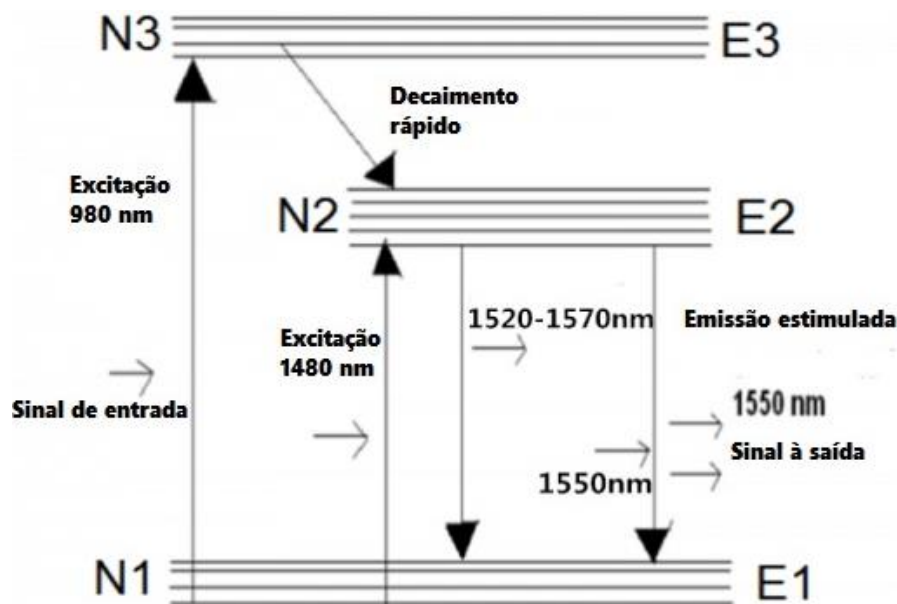


Figura 2.2 – Esquema parcial dos níveis de energia e transições entre níveis dos iões de érbio presentes numa fibra ótica quando sujeitos a excitação. Baseado em [47].

### 2.2.1.2 Configurações de um DFA

Existem três configurações básicas possíveis para este tipo de amplificadores com diferentes sentidos relativos de propagação do sinal a ser transmitido e do sinal de bombagem. Na figura 2.3 é apresentada uma representação esquemática de cada uma destas configurações. Na figura 2.3 (a) é visível a configuração co-propagante, onde o sinal da fonte de bombeamento é inserido de forma

seguir na mesma direção do sinal que é transmitido na fibra. Esta configuração garante que a inversão de população (e consequentemente o ganho) é maior à entrada do amplificador, proporcionando um baixo perfil de ruído. Normalmente, num sistema de comunicação ótica, é colocado o amplificador com menor ruído no início do sistema de comunicação, caindo essa escolha num amplificador com esta configuração. Contudo o desempenho deste relativamente ao ruído degrada-se com as perdas introduzidas pelo acoplador WDM, sendo que estas perdas simplesmente são adicionadas à figura de ruído da própria fibra [2].

Na figura 2.3 (b) é mostrada a configuração contra-propagante. Neste caso, a fonte de bombeamento é inserida de forma a que o seu sinal siga no sentido oposto ao sinal de transmissão. A potência à saída do amplificador será maximizada uma vez que toda a potência de bombeamento está concentrada nessa zona, levando a uma elevada potência de saturação. Contudo, não é possível obter uma potência elevada e uma baixa figura de ruído em simultâneo, devido à saturação que degrada a inversão da população [2].

Finalmente, na figura 2.3 (c) é apresentada a configuração bidirecional, onde são utilizadas duas fontes de bombeamento com os respetivos sinais a propagarem-se em sentidos opostos entre si. Esta montagem é muito eficiente, uma vez que permite que a inversão da população (e consequentemente o ganho) seja mais uniforme ao longo de todo o amplificador. No entanto esta configuração é mais dispendiosa e complexa que as anteriores, uma vez que obriga à utilização de mais componentes, desde logo com a necessidade de duas fontes de bombeamento [44].

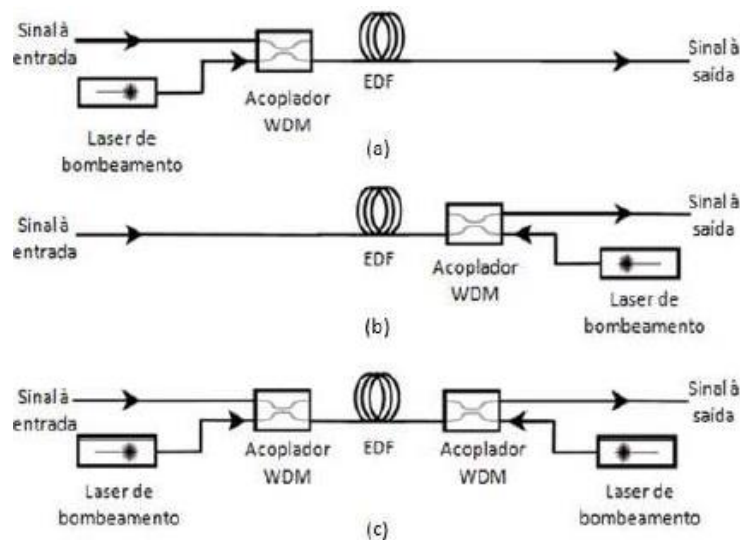


Figura 2.3 – Tipos de configuração básicas para o bombeamento de fibras dopadas: (a) Co-propagante; (b) Contra-propagante; (c) Bidirecional.

Os amplificadores óticos de fibra dopada podem ser utilizados para três propósitos distintos, variando a sua posição na rede de transmissão e as suas características, pré-amplificador, amplificador intensificador de sinal (*booster*) ou amplificador em linha (*in-line*). Um pré-amplificador é geralmente instalado próximo do recetor de forma a amplificar o sinal, que tem uma intensidade muito baixa devido à degradação que sofre ao longo do sistema, melhorando a sensibilidade do recetor. Este tipo de amplificador deve garantir um ganho elevado para sinais de entrada de baixa potência. Um *booster* é posicionado no início do sistema, logo após o emissor de forma a amplificar a potência do sinal de transmissão. Um amplificador deste tipo deve garantir sobretudo uma elevada potência de saída, sendo o ganho inferior ao verificado nos pré-amplificadores. Os amplificadores *in-line* são normalmente um complemento aos outros tipos de



amplificador, sendo instalados de forma periódica ao longo de redes de transmissão longas (a cada 80-100 km) de forma a compensar a atenuação causada pelos elevados comprimentos de fibra. Este tipo de amplificador deve garantir uma potência de saída semelhante ao obtido no caso do *booster* e em simultâneo apresentar o ganho mais elevado possível [44].

### 2.2.1.3 Características de desempenho

O desempenho de um amplificador ótico é caracterizado com base em vários parâmetros, entre os quais o seu ganho, saturação do ganho, saturação da potência de saída, saturação da potência de bombeamento e figura de ruído. Estes parâmetros dependem de diversos fatores inerentes à fibra ótica utilizada e às condições experimentais utilizadas. Desde logo, o ganho depende da concentração de iões,  $N_T$ , do comprimento de fibra dopada,  $L$ , do raio do núcleo desta,  $r_n$ , do raio do núcleo da fibra, que corresponde à zona onde estão presentes os iões dopantes,  $r_d$ , da potência de bombeamento utilizada na excitação,  $P_b$ , da potência do sinal de entrada,  $P_s$ , e dos coeficientes de absorção e de ganho,  $\alpha^*$  e  $g^*$ , respetivamente. As equações apresentadas de seguida relativas ao funcionamento dos amplificadores são baseadas em [44]. O ganho é então obtido por:

$$G = \Gamma \exp \left[ \int_0^L \exp(\sigma_e N_2 - \sigma_a N_1) dz \right] \quad (2.1)$$

Onde  $N_1$  e  $N_2$  são respetivamente as densidades de população dos níveis de energia  $^4I_{15/2}$  e  $^4I_{13/2}$ , apresentados na figura 2.1,  $\Gamma$  é o fator de sobreposição,  $\sigma_a$  e  $\sigma_e$  são respetivamente as secções eficazes de absorção e de emissão.

O fator de sobreposição,  $\Gamma$ , representa a sobreposição entre a região do núcleo dopada pelos iões e o modo fundamental de propagação do sinal de entrada na fibra. Este pode ser calculado da seguinte forma:

$$\Gamma = 1 - e^{-\frac{r_d^2}{w^2}} \quad (2.2)$$

Onde  $w$  é o raio do modo fundamental de propagação.

As secções eficazes de absorção ( $\sigma_a$ ) e de emissão ( $\sigma_e$ ) são calculadas, respetivamente, através de [48]:

$$\sigma_a = \frac{\alpha^*}{N_T \cdot \Gamma} \quad (2.3)$$

$$\sigma_e = \frac{g^*}{N_T \cdot \Gamma} \quad (2.4)$$

Experimentalmente, também é possível calcular o ganho, usando a razão entre as potências de saída,  $P_S^{out}$ , e de entrada do sinal no amplificador,  $P_S^{in}$  e é tipicamente medida em decibéis (dB).

$$G = 10 \cdot \log_{10} \frac{P_S^{out}}{P_S^{in}} \quad (2.5)$$

Existem dois regimes de ganho nos amplificadores óticos. O primeiro, designado em inglês por *small-signal*, considera a gama de potências de sinal de entrada em que a amplificação do sinal não reduz significativamente o ganho do amplificador. Nesta situação, a taxa de iões dopantes no

estado excitado é superior à taxa de emissão estimulada, mantendo o ganho constante à medida que a potência do sinal de entrada aumenta. Quando a potência do sinal de entrada é elevada o suficiente de forma a que a taxa de emissão estimulada afete seriamente a população do estado excitado atinge-se o regime de saturação do ganho. Neste regime, para uma determinada potência de bombeamento, a taxa de iões excitados manter-se-á constante. À medida que a potência do sinal de entrada aumenta além dos valores de *small-signal* mais fotões irão percorrer a fibra, estimulando a emissão de fotões (através do decaimento) e diminuindo a população do estado excitado sem que este seja preenchido com a velocidade necessária [49]. Assim, a amplificação chega a um limite e o ganho irá diminuir à medida que a potência do sinal de entrada aumenta. Observa-se a saturação da potência do sinal à saída, que corresponde à potência de saída para a qual o ganho do amplificador é 3 dB inferior ao ganho para *small-signal*. As características de saturação de um amplificador podem ser alteradas com a variação da potência de bombeamento usada. O ganho é maior com o aumento da potência de bombeamento, no entanto, também esta apresenta um limite de saturação a partir do qual o ganho estabiliza. Isto ocorre quando a potência de bombeamento é suficientemente elevada para esvaziar o nível de energia fundamental, diminuindo a taxa de bombeamento dos iões dopantes.

A figura de ruído de um amplificador (NF) quantifica a degradação da razão sinal-ruído verificada no sinal ótico transmitido quando este passa no amplificador. Esta depende do ganho do amplificador,  $G$ , da potência de emissão espontânea amplificada,  $P_{ASE}$ , da frequência do sinal,  $\nu$ , e da largura de banda em torno do sinal utilizado,  $\Delta\nu$ , sendo possível obter o seu valor através de [45]:

$$NF = \frac{1}{G} \cdot \left( \frac{P_{ASE}}{\Delta\nu \cdot h \cdot \nu} + 1 \right) \quad (2.6)$$

Onde  $h$  é a constante de Planck. Estudos realizados com amplificadores deste tipo mostram que o limite quântico para o mínimo da figura de ruído para ganhos muito elevados está situado entre os 2 e os 3 dB [50] [40].

A razão sinal-ruído (OSNR) funciona como parâmetro de avaliação do desempenho de um amplificador. Esta é dada pela razão entre a potência do pico do sinal,  $P_S^{out}$ , e a potência da ASE à saída do amplificador, dada pelo valor do nível de ruído na região espectral do pico do sinal numa dada largura de banda:

$$OSNR = \frac{P_S^{out}}{P_{ASE}} + \frac{b_{res}}{b_{ref}} \quad (2.7)$$

Onde  $b_{ref}$  é a referência da largura de banda ótica, tipicamente definida como 0.1 nm, e  $b_{res}$  corresponde à resolução do instrumento utilizado na medição.

## 3. Caracterização das fibras óticas dopadas

As fibras que nos foram fornecidas para caracterização têm os seguintes dopantes presentes no seu núcleo: na fibra HPEr-2 verifica-se a presença do érbio e na fibra Bi-7 temos a presença do bismuto, como referido no início do trabalho. Estes elementos (sobretudo o érbio) estão bastante estudados na literatura [2] [3] o que nos permite direcionar o estudo da luminescência destas fibras para a região onde as transições eletrônicas destes elementos são observados (região do infravermelho). Como complemento à análise da fibra HPEr-2, caracterizaram-se fibras comerciais (dopadas com diferentes concentrações de érbio), que servem como termo de comparação. Não foi possível utilizar uma fibra comercial que tivesse como dopante o bismuto, não sendo possível fazer uma análise comparativa para a fibra Bi-7.

A caracterização das várias fibras focou-se na medição da atenuação e da fotoluminescência. A análise da fotoluminescência foi realizada de duas formas diferentes, com diferenças significativas na montagem experimental utilizada. As montagens experimentais de cada teste serão apresentadas neste capítulo, bem como os resultados obtidos. No final do capítulo será feito um sumário das conclusões a retirar de todos os testes.

### 3.1 Análise de pré-formas

Como referido no capítulo 2, foram fornecidas algumas amostras de pré-formas de fibras óticas com o objetivo de serem analisadas de forma a perceber as suas características. Para isto, montou-se um aparato experimental onde foi utilizado um monocromador SPEX 1000M equipado com uma rede de difração de 600 linhas/mm, utilizando uma largura das fendas de entrada e saída de 500  $\mu\text{m}$ . Utilizou-se um laser de estado sólido com um comprimento de onda de 532 nm como fonte de excitação. Entre a saída da amostra e a fenda de entrada do monocromador foi utilizado um modulador mecânico – *Chopper Controller*, modelo SR540 da *Standford Research Systems, Inc.*, que modula o feixe ótico com uma frequência de 20 Hz, estando a referência de saída ligada a um amplificador *Lock-In*, modelo SR530 da *Standford Research Systems, Inc.*, de maneira a selecionar os sinais com a frequência de 20 Hz. A deteção da emissão da amostra foi efetuada com um detetor de Ge da *Applied Detector Corporation*, arrefecido à temperatura do azoto líquido (77 K). Este detetor apresenta uma região espectral desde 0.8 a 1.7  $\mu\text{m}$ . Por último, o sinal é enviado para o computador que permite o registo do espectro de luminescência da amostra através de um programa de aquisição de dados – *Automated Spectrum Acquisition*. O esquema desta montagem experimental é apresentado na figura 3.1, onde se mostra o alinhamento do laser de excitação com o núcleo das pré-formas e por sua vez, deste com a entrada do monocromador, procurando-se medir alguma emissão relativa às amostras.

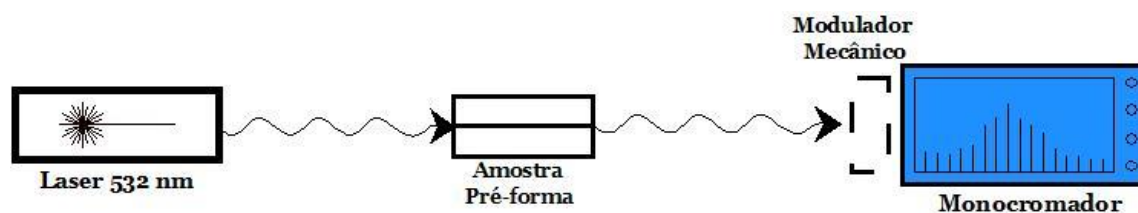


Figura 3.1 – Esquema da montagem experimental utilizada na análise das amostras de pré-formas.

Foram testadas as várias pré-formas disponíveis, sendo apresentados na figura 3.2 (a) e (b) os resultados de duas destas amostras, a NIMEY-4 contendo érbio como um dos dopantes presentes e a Hf-Bi-4 contendo bismuto como um dos dopantes. A análise foi feita numa região muito larga do espectro (900-1650 nm) e a potência de excitação utilizada foi de 21.5 mW. Pela análise destes resultados, verifica-se que para ambas as amostras apenas são medidas linhas referentes às segunda e terceira ordens que ocorrem devido ao funcionamento da rede de difração do monocromador. Desta forma, o estudo da fotoluminescência das pré-formas não permitiu obter qualquer informação sobre estas e, como tal, dá-se esta análise por concluída.

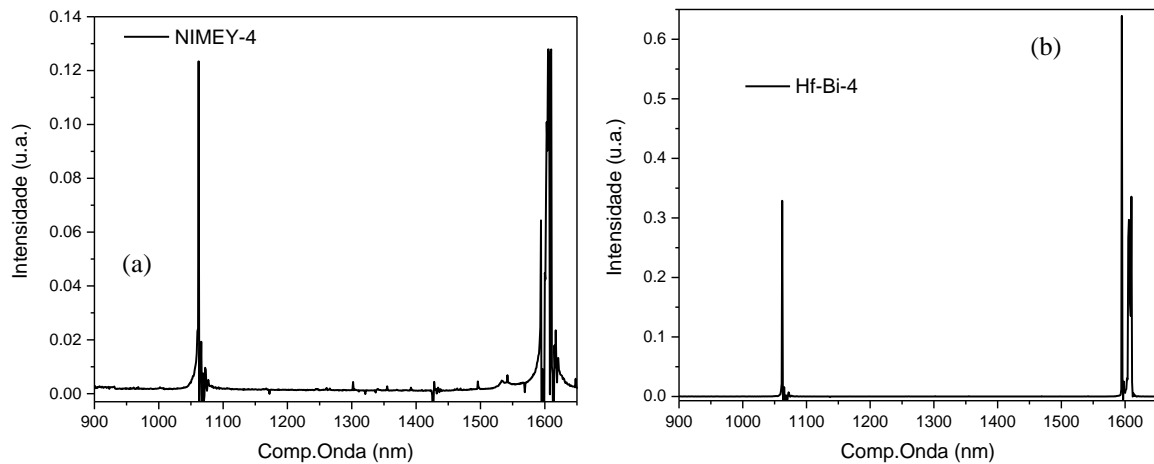


Figura 3.2 – Espectros de fotoluminescência medidos utilizando uma potência de excitação de 21.5 mW para as amostras de pré-formas (a) NIMEY-4 e (b) HfBi-4.

### 3.2 Atenuação das fibras

Para a realização das medidas de atenuação recorreu-se a um *Optical Spectrum Analyzer* (OSA), modelo Q8384 da *Advantest*. A emissão de luz foi feita através de uma fonte de banda larga *Fianium WhiteLase*, modelo *SuperK EXTREME*. A fonte de banda larga foi ligada à fibra ótica em estudo, estando a fibra ligada diretamente ao OSA. Esta montagem está esquematizada na figura 3.3.

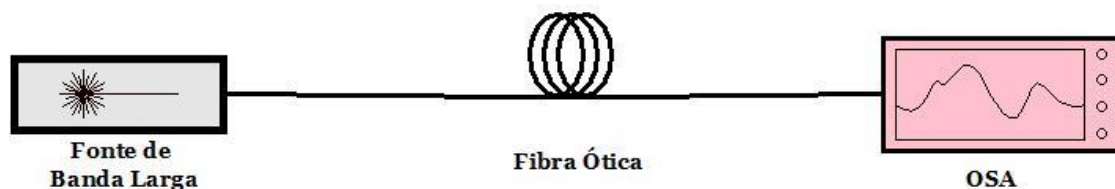


Figura 3.3 – Esquema da montagem experimental das medidas de atenuação das fibras óticas estudadas.

Estas medidas foram realizadas para as fibras HPEr-2 e Bi-7 (fornecidas pelo *Central Glass & Ceramic Research Institute*) e para as fibras I-25, M-5 e I-4 da *FIBERCORE* (fibras comerciais dopadas com érbio). Foram utilizadas amostras de cada fibra com 1 m de comprimento e a atenuação foi medida numa região espectral dos 600 aos 1700 nm.

Na figura 3.4 é apresentado o espectro de atenuação da fibra Bi-7, onde é visível uma atenuação elevada na região dos 600-1100 nm. Esta atenuação tem dois pontos máximos, o primeiro em torno dos ~700 nm com um valor de ~5 dB e o segundo em torno dos ~950 nm com um valor de ~13 dB. Esta região onde se obtém o máximo de atenuação corresponde à região de absorção do bismuto, por isso era já esperado um valor de atenuação elevado nesta região. Além disto esta fibra apresenta também alguma atenuação na gama espectral (1350-1700 nm), sendo o valor mínimo medido de ~1 dB para um comprimento de onda próximo dos 1450 nm. Este comportamento surge numa região onde o bismuto já não absorve energia, podendo ser devido a problemas no processo de fabrico que introduziram defeitos no núcleo na fibra, à combinação de dopantes não ser a ideal, ou a perdas introduzidas pelos conetores usados.

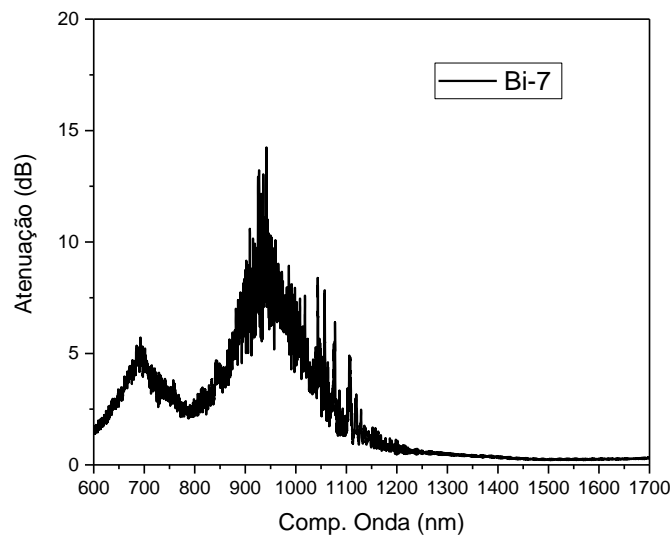


Figura 3.4 - Espectro de atenuação da fibra Bi-7 com um comprimento de 1 m, na gama espectral 600-1700 nm.

Na figura 3.5 é apresentado o espectro de atenuação da fibra HPER-2, que apresenta duas zonas com atenuação elevada, a primeira com uma atenuação de ~15 dB, situada entre os 950-1000 nm e a segunda com um valor de atenuação de ~30 dB na região dos 1400-1600 nm. Estas zonas de atenuação elevada são as zonas em que o érbio absorve energia como referido no capítulo 2. Na restante gama espectral estudada, a fibra apresenta perdas baixas. Este comportamento da fibra mostra que o érbio é o dopante principal desta e que os restantes elementos presentes no núcleo da fibra têm como função alterar o comportamento do érbio na fibra, possibilitando, por exemplo, o aumento da concentração deste sem aumento de atenuação.

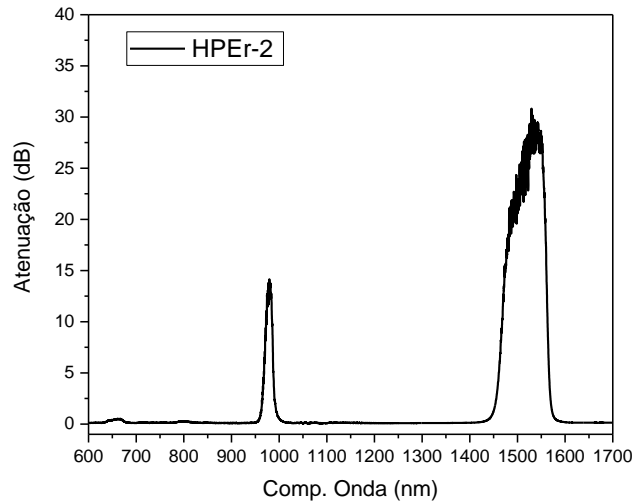


Figura 3.5 - Espectro de atenuação da fibra HPEr-2 com um comprimento de 1 m, na gama espectral 600-1700 nm.

Em relação às fibras comerciais analisadas, existe informação fornecida pelo fabricante disponível na folha de especificações de cada uma. As fibras I-4 e M-5 apresentam uma baixa concentração de érbio e são utilizadas em EDFAs de ganho muito elevado, que utilizam um comprimento de fibra elevada, assim são pouco sensíveis a variações do comprimento de fibra utilizado, facilitando a montagem e instalação do dispositivo. A fibra I-25 tem uma concentração de érbio muito elevada, sendo utilizada especialmente para realizar amplificação na banda-C com fibras curtas, baixando o custo do sistema, ou em amplificadores na banda L com o mesmo propósito, baixar o comprimento de fibra necessário ao funcionamento do amplificador. Na folha de especificações são apresentados valores típicos de absorção e de emissão, que são úteis para verificar se a análise realizada está correta.

Nas figuras 3.6 (a) e (b) são visíveis os espectros de atenuação da fibra I-4 e M-5, respetivamente. Da análise das duas figuras conclui-se que o seu comportamento é muito semelhante. Verifica-se que dos 600-1250 nm existe muito ruído. A partir daí as fibras têm uma atenuação mais constante, com um mínimo situado nos ~1540 nm, o que está de acordo com a informação disponível na folha de especificações. Estes resultados confirmam que o processo de medição da atenuação foi correto.

Comparando os espectros de atenuação das fibras I-4 e M-5 com o espectro da fibra HPEr-2 (figura 3.5), observa-se que existem grandes diferenças no comportamento das fibras. Desde logo os valores de atenuação no caso destas fibras são mais baixos que os valores medidos na fibra HPEr-2. Este resultado sugere que estas duas fibras não serão as mais adequadas para comparar com a fibra a caracterizar.

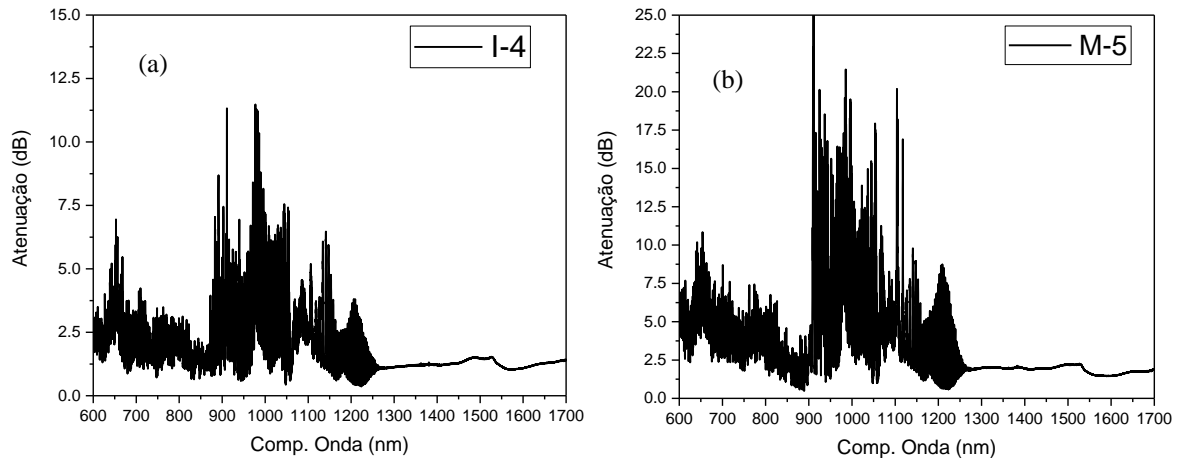


Figura 3.6 - Espectros de atenuação das fibras I-4 (a) e M-5 (b) com um comprimento de 1 m, na gama espectral 600-1700 nm.

Na figura 3.7 é apresentado o espectro de atenuação da fibra I-25. Verificam-se duas zonas de atenuação muito elevada, a primeira situada entre os 950-1000 nm, com valor máximo de ~15 dB, e a segunda situada entre os 1450-1560 nm, tendo como valor máximo ~18 dB. É possível verificar também que existe uma pequena banda de atenuação na zona dos ~670 nm com valor de ~1.5 dB. A comparação dos espectros de atenuação desta fibra e da fibra HPER-2 mostra que o comportamento de ambas é semelhante. Ambas apresentam valores de atenuação muito elevados (acima de 20 dB) e os picos de atenuação surgem nas mesmas regiões do espectro, apesar da banda de atenuação da fibra HPER-2 ser mais larga. Assim, é possível afirmar que esta fibra será um bom termo de comparação. Estes resultados também sugerem que a fibra HPER-2 tem uma elevada concentração de érbio no seu núcleo.

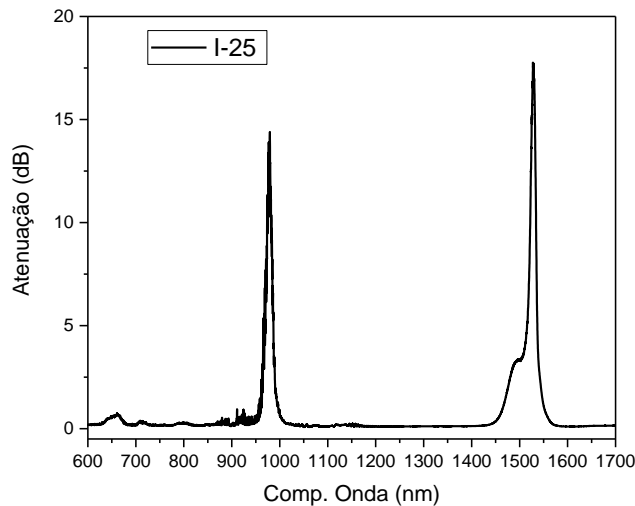


Figura 3.7 - Espectro de atenuação da fibra I-25 com um comprimento de 1 m, na gama espectral 600-1700 nm.

### 3.3 Emissão para baixas potências

O estudo da emissão das fibras é essencial para caracterizar o seu comportamento e definir a forma como poderão ser utilizadas em dispositivos óticos. Assim, começou-se por realizar medidas de fotoluminescência para potências de excitação baixas.

Antes de realizar as medidas para as fibras óticas e de forma a garantir que tudo estava a funcionar corretamente no espectrómetro, foi realizado um teste numa amostra volúmica contendo uma elevada concentração de érbio e com uma luminescência conhecida [51]. Para isto foi utilizada a montagem experimental esquematizada na figura 3.8. Foi usado o monocromador SPEX 1000M já referido anteriormente, a largura das fendas de entrada e de saída tomou valores entre 150-500  $\mu\text{m}$ , variados pelo utilizador dependendo da intensidade do sinal emitido pela amostra. A excitação foi realizada recorrendo ao mesmo laser usado anteriormente, utilizando potências de excitação entre os 2 e os 28 mW. O equipamento utilizado após a saída da amostra até à obtenção dos dados é o mesmo que foi descrito na secção 3.1, sendo que, neste caso foi também utilizado um detetor de Si *HORIBA DSS-S025TC*, com uma gama de funcionamento de 0.6 a 1.1  $\mu\text{m}$ , como alternativa ao detetor de Ge para a realização de algumas medidas.

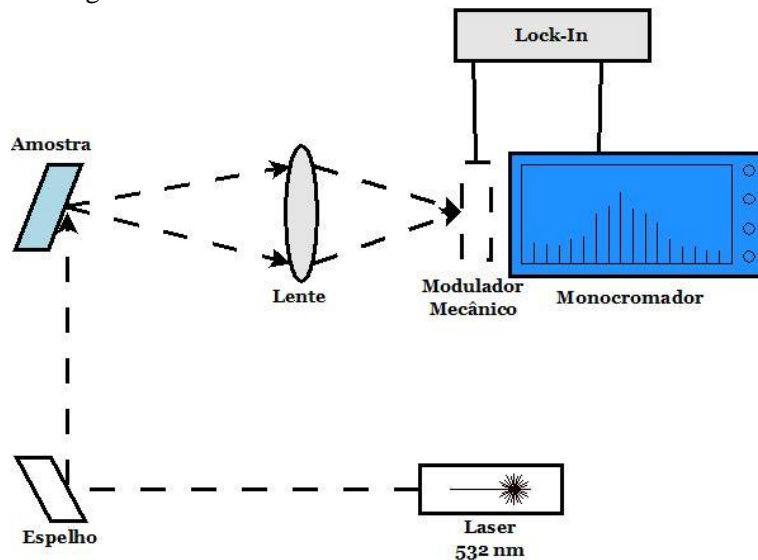


Figura 3.8 – Esquema da montagem experimental utilizada nas medidas de luminescência para uma amostra volúmica.

A amostra foi fixada a um poste cilíndrico, fixo na bancada, mas, sendo a amostra um paralelepípedo, foi necessário garantir a correta fixação da amostra, por isso foi utilizada fita adesiva de *Teflon* colocada nos bordos superior e inferior da amostra e em torno do poste utilizado. Procurou-se que a área coberta pela fita adesiva fosse a menor possível de forma a maximizar a área onde iria incidir a luz do laser. De seguida alinhou-se a luz do laser com a amostra, procurando não só maximizar a área atingida pela luz, mas também centrar a luz laser na amostra em busca de uma emissão mais homogénea. A emissão da amostra é focada na entrada do monocromador com recurso a uma lente de distância focal de 12.5 cm. Procurou-se alinhar a luz vinda da amostra com o centro da lente, estando esta à mesma altura da amostra. A posição da lente era variada com recurso a duas calhas fixas à bancada, que permitiam um movimento paralelo ao percurso da luz, mantendo o alinhamento da lente com a entrada do monocromador. A luz observada era verde, devido à reflexão da luz do laser na mesma direção da emissão da amostra, algo que foi útil para a focagem desta na



fenda de entrada. Conseguindo o alinhamento, todos os componentes são fixados e só eram movimentados no final das medições ou em caso de desalinhamento.

Os dados obtidos com o monocromador SPEX, para a amostra volúmica com érbio, foram comparados com dados desta mesma amostra obtidos com recurso a um espectrómetro de transformada de Fourier (FTIR). Esta comparação é apresentada na figura 3.9, onde se verifica que a emissão do érbio está situada entre os 1490 e os 1620 nm, tendo várias bandas de emissão distintas. Verifica-se também que existe um desvio nas posições dos picos de emissão da amostra, estando os valores obtidos com o monocromador SPEX ligeiramente desviados em relação ao medido pelo FTIR (2 a 5 nm). Isto deve-se a uma ligeira descalibração do monocromador SPEX. Ainda assim este desvio não é suficientemente significativo para nos impedir de usar o monocromador, uma vez que o comportamento da amostra é semelhante em ambos os casos e as zonas de emissão também são concordantes.

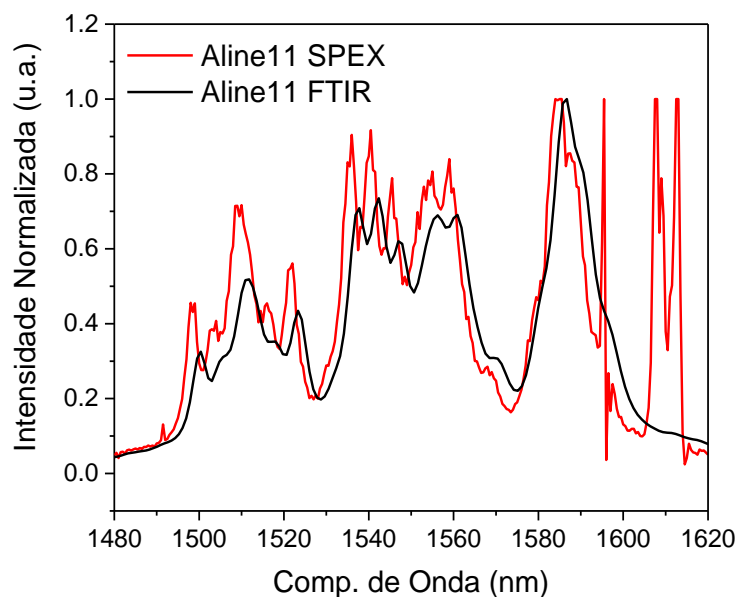


Figura 3.9 – Espectro de emissão de uma amostra volúmica obtido com o monocromador SPEX 1000M e com o espectrómetro FTIR Bruker Vertex 80v, equipado com um detetor de InGaAs.

Deste modo, passou-se para a análise das fibras óticas. Em primeiro lugar foi necessário encontrar uma forma precisa de posicionar as fibras para garantir o melhor alinhamento ótico possível e garantindo a sua reprodutibilidade. O principal problema a resolver foi o acoplamento da luz de excitação nas fibras. Para isto foram utilizados dois colimadores para fibra ótica com conetores FC, posicionados na entrada e na saída das fibras. O colimador de entrada funciona na gama do VIS/IR, com um diâmetro máximo do feixe de 10 mm, uma região espectral dos 350 aos 2200 nm com distância focal variável, que permite a otimização para cada comprimento de onda. O colimador de saída está otimizado para comprimentos de onda próximos dos 1550 nm, com um diâmetro máximo de feixe de 2 mm. Os colimadores foram fixados com recurso a posicionadores. Na figura 3.10 é apresentado um diagrama esquemático da configuração utilizada para realizar os testes com fibras óticas. Note-se que já não é necessário usar uma lente para focar o sinal à saída da fibra na fenda de entrada do monocromador, uma vez que o colimador de saída já deixa o feixe de luz colimado, bastando depois aproximar e alinhar o mesmo com a entrada do monocromador.

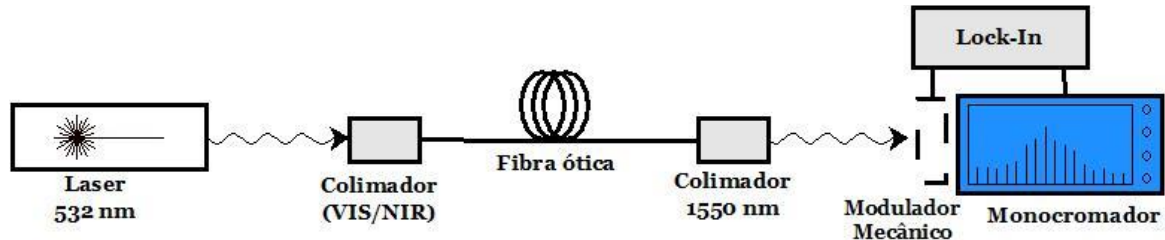


Figura 3.10 – Esquema da montagem experimental utilizada nas medidas de luminescência para as amostras de fibra ótica.

- **Fibra Bi-7**

Começou-se por estudar a emissão da fibra Bi-7. Sendo o bismuto o principal dopante desta fibra, a região espectral de interesse é dos 600-1300 nm, uma vez que é aqui que surgem as linhas de emissão deste elemento. Para garantir que era possível medir a luminescência da fibra em toda a gama de interesse, dividiu-se esta gama em duas zonas: a primeira zona situada nos 600-900 nm, onde se espera obter uma emissão vermelha por parte da amostra e a segunda zona situada nos 900-1300 nm, onde será medida uma emissão no infravermelho. Esta divisão era necessária, uma vez que os detetores disponíveis não eram, por si só, capazes de abranger toda a gama espectral necessária. Assim, para a primeira zona de interesse foi utilizado o detetor de Si e para a segunda zona de interesse foi utilizado o detetor de Ge. Foram conectorizadas amostras desta fibra com vários comprimentos (0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.75 e 1 m), sendo realizada a análise da luminescência de cada amostra utilizando uma potência de excitação de 21.5 mW. Por uma questão de conveniência, começou-se por medir a zona de emissão no infravermelho. A tensão aplicada ao detetor foi de 150 V e a abertura das fendas do monocromador foi de 400  $\mu\text{m}$ .

Na figura 3.11 são apresentados os espectros de emissão para os vários comprimentos de fibra testados nesta gama espectral. Verifica-se uma emissão com o seu máximo centrado em torno dos 1100 nm e observa-se que a intensidade relativa da emissão da fibra aumenta com a diminuição do comprimento desta. Verifica-se também que existem linhas de elevada intensidade relativa referentes às segunda e terceira ordens que surgem graças à rede de difração do monocromador. Estas situam-se em torno dos 1064 e dos 1610 nm, não apresentando estas qualquer interesse para o estudo a realizar.

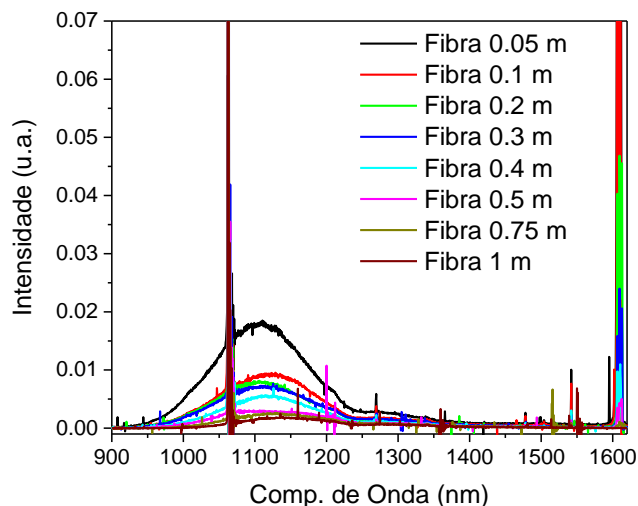


Figura 3.11 - Espectros de fotoluminescência medidos para a fibra ótica Bi-7 com vários comprimentos e com uma potência de excitação de 21.5 mW, comprimento de onda de excitação de 532 nm, abertura das fendas de entrada e saída de 400  $\mu\text{m}$  e a tensão aplicada ao detetor de 150 V.

Utilizando a mesma montagem experimental, foi medida a emissão desta fibra para um comprimento fixo (0.1 m) quando sujeita a várias potências de excitação. Este comprimento de fibra foi escolhido, pois era o que melhor conciliava um valor de intensidade relativa de emissão elevado (verificado na figura 3.10) com um fácil manuseamento. Procurou-se distribuir os valores da potência de excitação de forma uniforme ao longo da gama de funcionamento do laser, algo que nem sempre foi fácil devido às oscilações na potência do feixe. Na figura 3.12 são apresentados os resultados de emissão para as várias potências de excitação testadas. A gama de comprimentos de onda medidos foi diminuída até 1300 nm, uma vez que o espectro da figura 3.11 não mostra bandas de emissão fora desta gama. Analisando a figura 3.12 verifica-se que a banda de emissão se situa entre os 975-1225 nm, com o seu máximo em torno dos  $\sim 1125$  nm, estando de acordo com o resultado da figura 3.11. A intensidade relativa da emissão aumenta linearmente com o aumento da potência de excitação.

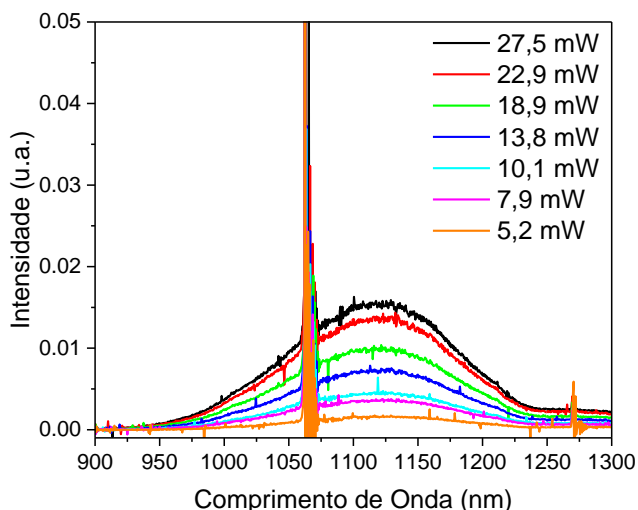


Figura 3.12 - Espectro de emissão da amostra de 0.1 m da fibra Bi-7 para várias potências de excitação distribuídas na gama de valores possíveis do laser, comprimento de onda de excitação de 532 nm, abertura das fendas de entrada e saída de 400  $\mu\text{m}$  e uma tensão aplicada ao detetor de 150 V.

De seguida, tentou-se medir o espectro de emissão de forma semelhante ao que foi feito acima para a outra zona de interesse definida para esta fibra (600-900 nm). Começou-se por estudar a emissão da fibra para uma potência de excitação fixa (21.5 mW), para amostras de fibra com 0.05 m. Na figura 3.13 (a) é apresentado o espectro obtido. Verifica-se que não existe qualquer emissão luminescente que seja relativa ao bismuto, apenas um pico de intensidade relativa ao funcionamento da rede de difração do monocromador. Estes resultados causam alguma estranheza, uma vez que, como é mostrado na figura 3.13 (b), é possível ver a olho nu a luz vermelha emitida pela fibra quando esta é excitada. Estes resultados podem dever-se à menor sensibilidade por parte do detetor de Si em comparação com o detetor de Ge, algo que não era possível resolver, uma vez que o detetor de Ge não tinha capacidade para medir nesta região do espectro e estes eram os únicos detetores disponíveis no laboratório. Outro fator que pode contribuir para a baixa emissão da fibra é, como visto anteriormente, a grande atenuação apresentada pela fibra Bi-7 nesta zona do espectro, o que significa que, mesmo havendo alguma emissão por parte da fibra nesta zona, essa luz é absorvida pela fibra impedindo a luz de chegar ao final da mesma.

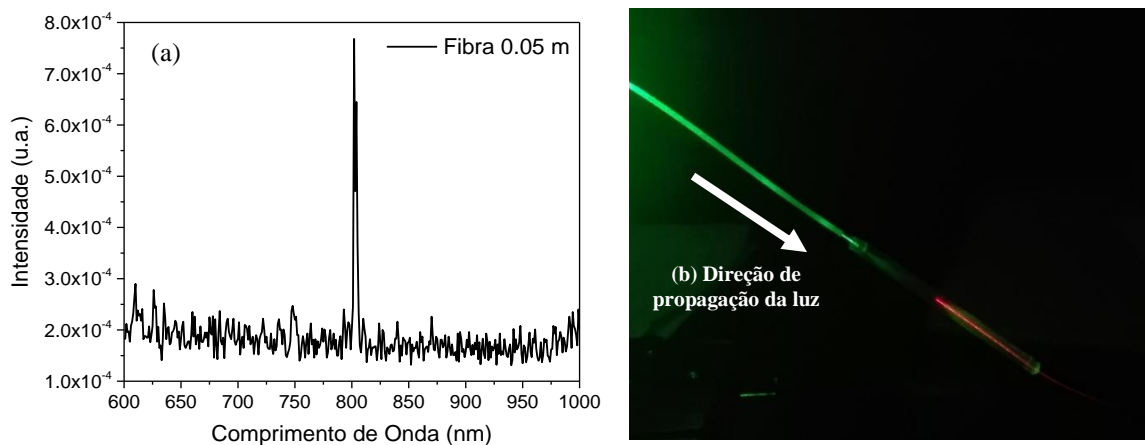


Figura 3.13 – Espectro de emissão da fibra Bi-7, amostra de 0.05 m, com o detetor de Si na gama de comprimentos de onda 600-1000 nm (a) e emissão vermelha da fibra quando excitada pelo laser verde (532 nm) com uma potência de 21.5 mW (b).

Visto que a amostra de fibra com 0.05 m é a mais pequena que se consegue analisar e considerando o comportamento evidenciado pela fibra na outra zona de interesse, conclui-se que não seria possível medir qualquer luminescência nesta zona para outros comprimentos de fibra e também não foi realizado o estudo da dependência da emissão com a variação da potência de excitação.

- **Fibra HPEr-2**

Passou-se então para a análise da emissão da fibra HPEr-2. A zona de interesse a medir para esta fibra é apenas relativa ao érbio, 1400-1700 nm, e, o detetor de Ge tem uma gama de funcionamento adequada a essa zona. Este foi então o detetor escolhido, sendo toda a montagem experimental igual ao utilizado nas medidas com a fibra Bi-7. Começou-se por medir o espectro de emissão de amostras de fibras com vários comprimentos para uma potência de excitação de 21.1 mW. Este valor é ligeiramente diferente do utilizado na fibra Bi-7 devido às oscilações de potência do laser, que dificultavam a tarefa de manter uma potência constante durante períodos de tempo grandes. A abertura das fendas de entrada e saída do monocromador foi de 300  $\mu\text{m}$  e a tensão aplicada ao detetor foi de 100 V. Os resultados obtidos são apresentados na figura 3.14, onde se verifica a

existência de emissão luminescente numa região onde era esperado observar as transições do érbio, ou seja, a emissão é mais intensa na região de comprimentos de onda  $\sim 1500-1575$  nm. Neste caso não é possível distinguir as várias transições estreitas que eram visíveis na figura 3.9, ocorrendo um alargamento destas, este alargamento deve-se ao facto do vidro ser amorfo, como referido no capítulo 2 [46]. Esta banda muito mais larga no caso das fibras de comprimentos inferiores a 0.3 m apresenta um ombro para comprimentos de onda menores  $\sim 1520$  nm, menos intenso que a banda principal. Um ponto interessante é o deslocamento da zona de transições mais intensa dos  $\sim 1560$  para os  $\sim 1600$  nm para fibras com comprimentos superiores a 0.3 m (inclusive). Com o aumento do comprimento de fibra, a intensidade relativa da emissão relacionada com o érbio diminui claramente sendo muito reduzida para a fibra de 1 m. Verifica-se novamente a presença das linhas relativas à terceira ordem do laser de excitação utilizado. Tal como verificado na fibra Bi-7, a intensidade relativa da emissão é superior para as amostras com comprimentos inferiores, uma vez que, como a potência do laser é baixa, apenas existe emissão no início da fibra, sendo esta imediatamente atenuada, não chegando ao final da fibra.

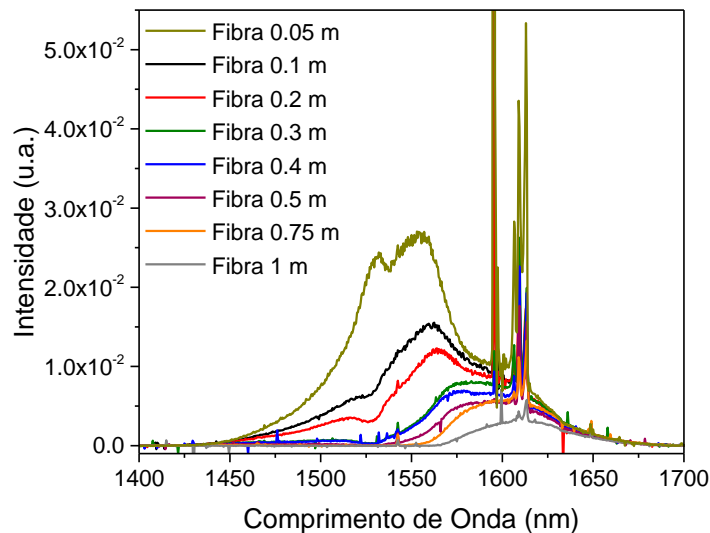


Figura 3.14 - Espectros de fotoluminescência medidos para vários comprimentos da fibra HPER-2 com uma potência de excitação de 21.1 mW. O comprimento de onda de excitação foi de 532 nm, com uma abertura das fendas de entrada e de saída no monocromador de  $300 \mu\text{m}$  e uma tensão aplicada no detetor de 100 V.

De seguida, e de acordo com o que foi feito anteriormente, realizou-se a análise de apenas um comprimento de fibra (0.1 m), sujeita a várias potências de excitação. Os resultados obtidos são apresentados na figura 3.15 sendo visível um aumento da intensidade da luminescência com o aumento da potência de excitação, como já havia sido verificado na fibra Bi-7. Observa-se também que, para potências de excitação acima dos 17.8 mW o aumento do sinal não é tão significativo como até então, revelando que se atinge uma saturação dos canais radiativos da fibra em torno desse valor. A forma do espectro está de acordo com o que foi medido anteriormente na fibra de 0.1 m, estando o seu máximo de intensidade situado na mesma região.

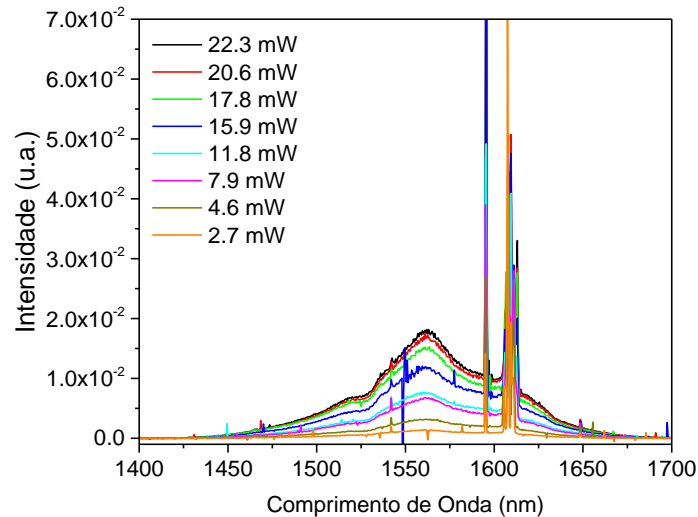


Figura 3.15 - Espectros de fotoluminescência medidos para a fibra ótica HPEr-2 com 0.1 m de comprimento, para várias potências de excitação distribuídas na gama 2.7-22.3 mW. O comprimento de onda de excitação foi de 532 nm, com uma abertura das fendas de entrada e de saída no monocromador de 300  $\mu\text{m}$  e uma tensão aplicada ao detetor de 100 V.

- **Fibras comerciais**

Foi também medido o espectro de emissão das fibras comerciais para amostras de vários comprimentos e mantendo uma potência de excitação constante. Mas, no caso destas fibras, como são usadas só para comparação, foram testados apenas amostras de três comprimentos (0.1, 0.5 e 1 m). Para a realização desta medida nestas fibras, foram mantidas as condições experimentais utilizadas para a fibra HPEr-2. Nas figuras 3.16 (a) e (b) são apresentados os espectros de emissão relativos às fibras I-4 e M-5, respetivamente. Tal como verificado no espectro de atenuação, estas fibras têm comportamentos semelhantes. Em ambas verifica-se a existência de emissão luminescente na zona onde era esperado, sendo a forma desta emissão muito semelhante entre as fibras. É perceptível a existência de um ombro situado nos  $\sim 1530$  nm característico da emissão do érbio e que também se verifica na fibra HPEr-2. Mas, existe uma grande diferença para estas fibras, a intensidade relativa da luminescência aumenta com o aumento do comprimento da amostra, sendo que a maior intensidade de emissão acontece para a amostra de 1 m. Este comportamento completamente oposto ao verificado para a fibra HPEr-2 reforça a ideia de que nenhuma destas fibras pode servir como termo de comparação com a fibra a caracterizar. Assim não serão realizados mais testes com estas duas fibras, dado que não acrescentam nenhuma informação útil a este trabalho.

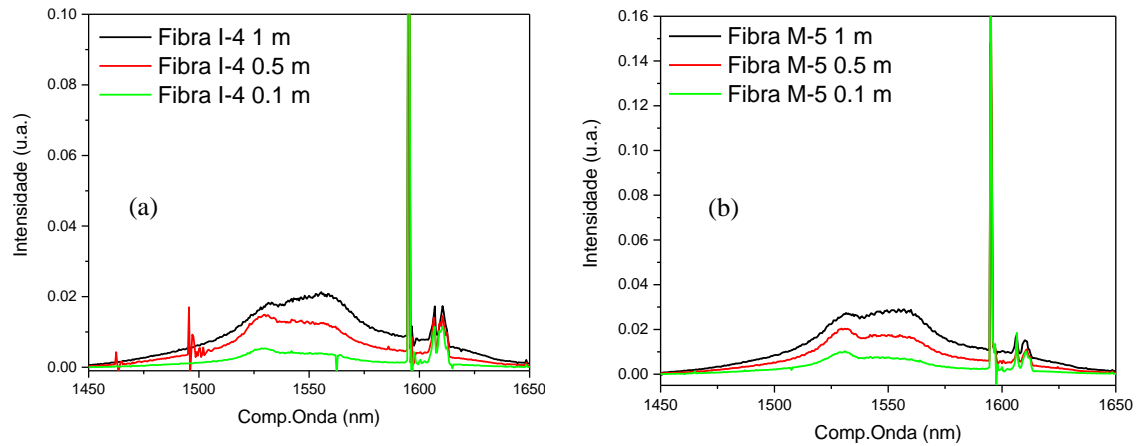


Figura 3.16 - Espectros de fotoluminescência medidos para vários comprimentos da fibra I-4 (a) e M-5 (b) com uma potência de excitação de 21.1 mW. O comprimento de onda de excitação foi de 532 nm, com uma abertura das fendas de entrada e de saída no monocromador de 300  $\mu\text{m}$  e uma tensão aplicada no detetor de 100 V.

O mesmo estudo foi realizado para a fibra I-25, para os comprimentos de 0.1, 0.5 e 1 m. As condições experimentais foram mantidas constantes, salvaguardando sempre o alinhamento do sistema. Os resultados obtidos são apresentados na figura 3.17, onde se observa um comportamento muito semelhante ao verificado para a fibra HPER-2 (figura 3.14). Foi observada uma banda de emissão entre os 1500-1620 nm, estando a zona de maior intensidade situada nos 1515-1555 nm. A emissão com maior intensidade relativa verifica-se para a amostra de menor comprimento, neste caso de 0.1 m. Para as amostras de comprimentos superiores, além de uma diminuição da intensidade relativa, verifica-se também o deslocamento do pico de emissão para a região dos  $\sim 1590$  nm. Este comportamento é muito semelhante ao apresentado pela fibra HPER-2 e o facto de se repetir para esta fibra permite concluir que a concentração de érbio em ambas as fibras é semelhante, ou seja, bastante elevada, e que a fibra I-25 será uma boa escolha para servir de ponto de comparação no trabalho a realizar daqui para a frente.

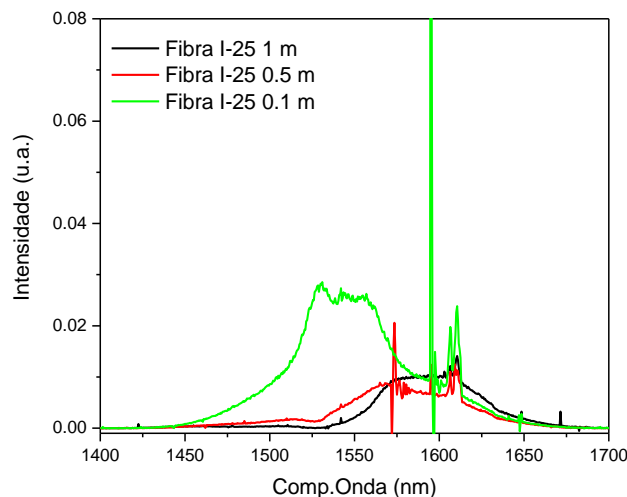


Figura 3.17 - Espectros de fotoluminescência medidos para vários comprimentos da fibra I-25 com uma potência de excitação de 21.1 mW. O comprimento de onda de excitação foi de 532 nm, com uma abertura das fendas de entrada e de saída no monocromador de 300  $\mu\text{m}$  e uma tensão aplicada no detetor de 100 V.

### 3.4 Emissão para potências elevadas

Os resultados relativos à atenuação das fibras em conjunto com os espectros de fotoluminescência levam-nos a concluir que utilizando potências de excitação superiores é possível obter melhores resultados. Foi assim medida a emissão de cada fibra (Bi-7, HPEr-2 e I-25) utilizando potências de excitação muito superiores às utilizadas na secção anterior. Para a realização destas medidas foi utilizada a montagem experimental correspondente ao esquema apresentado na figura 3.18. Foi utilizada como fonte de excitação um laser com comprimento de onda de 980 nm ligado a uma fonte de corrente e controlador de temperatura produzidos no IT. A luz emitida pelo laser era injetada diretamente na amostra de fibra em estudo, que, por sua vez estava ligada diretamente ao OSA (mesmo equipamento utilizado na secção 3.2).



Figura 3.18 – Esquema da montagem experimental utilizada na caracterização das fibras óticas para potências elevadas.

- **Fibra Bi-7**

Começou-se por analisar a fibra Bi-7, sendo testadas amostras de fibras com 0.1, 0.5 e 1 m de comprimento. A potência de excitação injetada na fibra foi de 100 mW, sendo este valor confirmado no início de cada teste, utilizando um medidor de potência, de forma a garantir a consistência dos resultados. Os resultados obtidos são apresentados na figura 3.19 (a). Verifica-se um comportamento muito semelhante em todos os comprimentos de fibra, sendo a única diferença a intensidade do espectro, que, tal como ocorreu para as medidas com baixa potência, é superior para os comprimentos de fibra menores. Este comportamento abre a possibilidade desta fibra não ter uma emissão relevante. Assim, foi medido o espectro do laser de excitação ligando o laser diretamente ao OSA com uma potência de 100 mW. Este espectro é apresentado na figura 3.19 (b) e pela sua observação, rapidamente se verifica que a forma do espectro do laser é em tudo semelhante aos espectros de emissão da fibra, apresentando os mesmos picos de emissão nos mesmos comprimentos de onda. Esta semelhança entre o espectro de emissão do laser e os espectros das várias fibras testadas permitem concluir que a fibra Bi-7 não apresenta emissão considerável, o que impossibilita a sua utilização em componentes óticos. Assim, a caracterização desta fibra é considerada concluída.



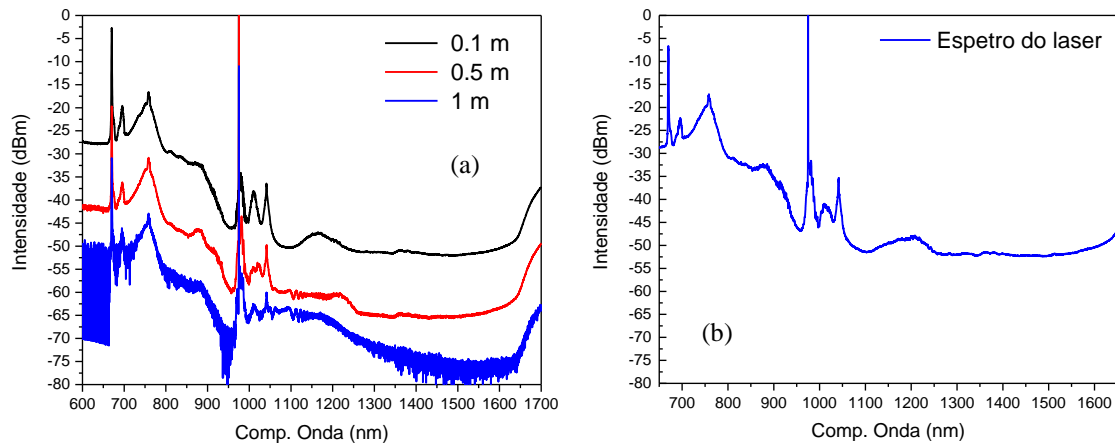


Figura 3.19 - Espectro de emissão da fibra Bi-7 para vários comprimentos (a) e espectro característico do laser (b) para uma potência de 100 mW.

- **Fibra HPEr-2**

Passando para a análise da fibra HPEr-2, foram conectorizadas amostras de fibra com 0.1, 0.5, 1, 2 e 4 m. Os comprimentos superiores (2 e 4 m) foram introduzidos de forma a analisar o desvio de comprimento de onda do pico de intensidade verificado para esta fibra (figura 3.14). A montagem experimental utilizada foi mantida igual assim como a potência de excitação. Os resultados obtidos para os vários comprimentos da fibra HPEr-2 são mostrados na figura 3.20. Desde logo, verifica-se que para a fibra de 0.1 m não é visível no espectro qualquer emissão. Isto acontece uma vez que a potência vinda do laser é muito elevada, acabando por se sobrepor à emissão vinda da fibra, que, por ter um comprimento curto apresenta uma intensidade muito baixa, não sendo medida qualquer emissão relativa ao érbio.

Para as fibras com 0.5 e 1 m observa-se um comportamento muito semelhante ao que tinha sido verificado nas medidas com potências baixas, a forma do espectro é semelhante, apresentando um ombro centrado nos 1530 nm, e uma região de emissão mais plana nos 1540-1560 nm. A intensidade da emissão é superior na fibra de 1 m em relação à fibra de 0.5 m. Outro ponto importante é a forma plana da emissão da fibra de 1 m, sendo essa diferença verificada de forma mais pronunciada para a fibra de 0.5 m.

Para a fibra de 2 m, começa a ser visível o desvio do pico de intensidade da emissão para uma zona em torno dos 1565 nm. Este comportamento está de acordo com o que aconteceu para potências mais baixas, sendo algo que pode ser útil na utilização desta fibra como amplificador, uma vez que a emissão verificada está situada próximo da banda L. Isto porque o desvio acontece, mas a intensidade da emissão continua a ser elevada (próxima do verificado para a fibra de 1 m). Apesar disto, a zona onde a emissão é máxima é mais estreita do que da região mais larga e plana verificada para as fibras de 0.5 e 1 m. Já para a fibra de 4 m verifica-se que a emissão está centrada num comprimento de onda de 1605 nm, mas esta apresenta uma intensidade muito baixa, sugerindo que para utilizar esta fibra, terão de ser utilizadas potências de excitação superiores aos 100 mW.

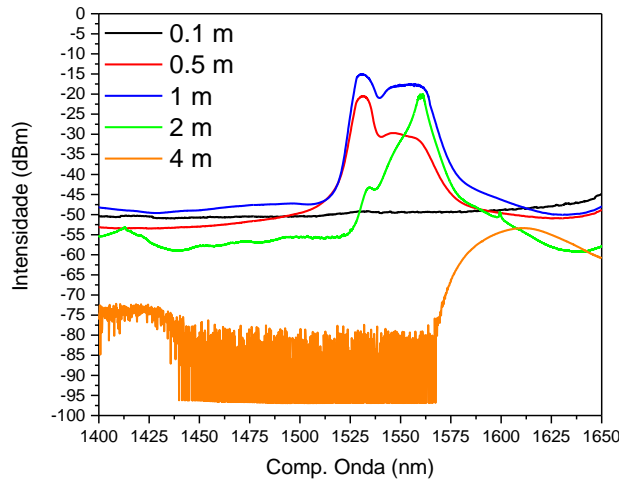


Figura 3.20 - Espectro de emissão da fibra HPEr-2 para vários comprimentos, com uma potência de excitação de 100 mW e um comprimento de onda de excitação de 980 nm.

Este comportamento da fibra HPEr-2 de 4 m sugere que, utilizando uma potência de excitação superior, será possível obter resultados de emissão com intensidade relativa semelhante à das fibras de comprimentos menores. Nesta fase do trabalho, a potência máxima que era possível injetar na fibra utilizando este laser era de 398 mW. O que permite obter os resultados visíveis na figura 3.21. A montagem experimental foi exatamente a mesma, só se alterou o valor da potência de excitação. Neste caso foram testados apenas três comprimentos de fibra (1, 2 e 4 m), visto serem estes os comprimentos que apresentavam valores de emissão mais elevados. Pela observação da figura 3.21, verifica-se novamente o deslocamento da emissão da fibra de 2 m em relação ao verificado na fibra de 1 m. A forma do espectro destes dois comprimentos é ligeiramente diferente do medido anteriormente. No que diz respeito à fibra de 4 m, observa-se de forma mais clara qual a forma da sua emissão, estando esta de acordo com o esperado. Existe um deslocamento para uma região de comprimentos de onda superiores e esta apresenta uma emissão de intensidade relativa mais elevada que as outras fibras na região dos ~1585-1600 nm.

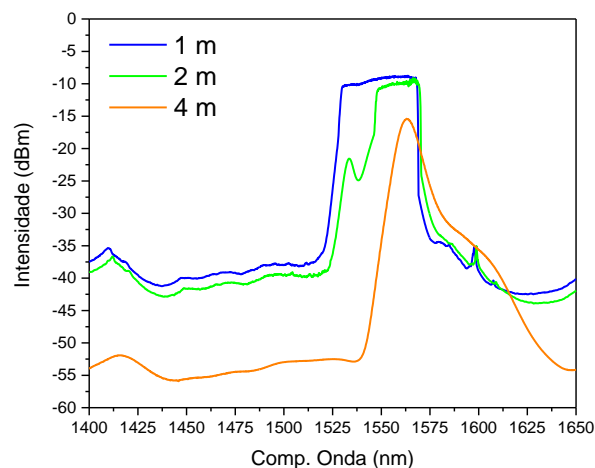


Figura 3.21 - Espectro de emissão da fibra HPEr-2 para vários comprimentos, com uma potência de excitação de 398 mW e um comprimento de onda de excitação de 980 nm.

- **Fibra I-25**

Foi realizado o mesmo estudo para a fibra I-25, utilizando amostras de fibra com comprimentos de 0.1, 0.5, 1, 2 e 4 m. Os espectros de emissão relativos a esta fibra são apresentados na figura 3.22. Verifica-se que para a amostra de fibra com 0.1 m não se observa qualquer emissão, como havia sucedido para a fibra HPER-2. Em relação às fibras com 0.5, 1 e 2 m, observa-se um comportamento semelhante ao verificado anteriormente (quer para esta fibra com baixas potências de excitação, quer para a fibra HPER-2), sendo visível a emissão característica do érbio, com a forma que já foi descrita. A intensidade relativa desta emissão vai aumentando com o comprimento da fibra, atingindo o valor máximo para a fibra de 2 m. Para este comprimento de fibra, verifica-se que a região dos 1525-1560 nm apresenta uma emissão bastante plana, sem grandes oscilações no seu valor (semelhante à emissão da fibra HPER-2 de 1 m), o que era esperado para uma fibra comercial deste tipo. A amostra de 4 m apresenta o seu pico de intensidade deslocado, estando este centrado nos ~1565 nm. Este comportamento vai ao encontro do que foi medido para esta fibra nos ensaios com baixas potências.

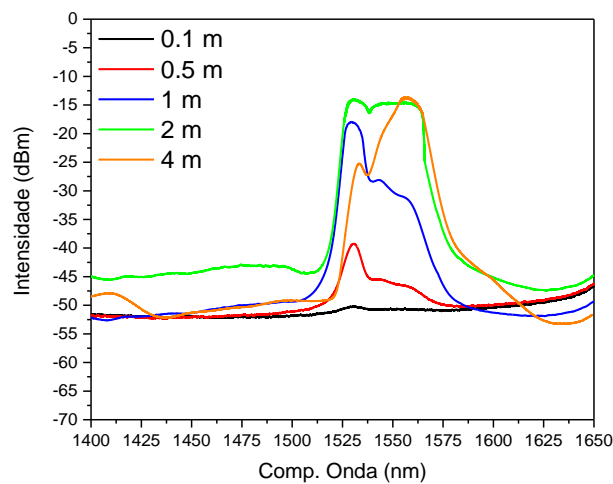


Figura 3.22 - Espectro de emissão da fibra I-25 para vários comprimentos, com uma potência de excitação de 100 mW e um comprimento de onda de excitação de 980 nm.

Por uma questão de coerência, foi também estudada a fibra I-25 para uma potência de excitação de 398 mW. Os comprimentos de fibra utilizados foram os mesmos que para a fibra HPER-2, ou seja, 1, 2 e 4 m. São apresentados os resultados obtidos na figura 3.23. Confirma-se o comportamento observado anteriormente para estes comprimentos de fibra, sem que exista alterações significativas no seu comportamento. A única diferença visível é a saturação da emissão em todos os comprimentos de fibra. Um ponto interessante é, comparando estes resultados com os obtidos para a fibra HPER-2 (figura 3.21), que as emissões de ambas as fibras são semelhantes, mas, para a fibra HPER-2, é necessário um comprimento de fibra menor (cerca de metade). Este ponto pode representar uma mais valia e como tal será novamente testado mais à frente neste trabalho.

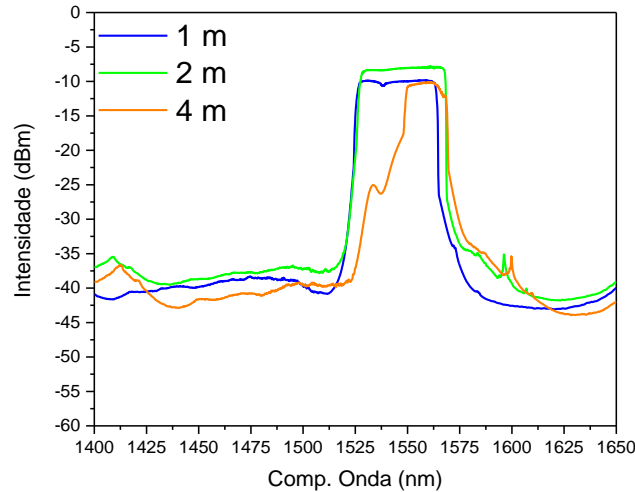


Figura 3.23 - Espectro de emissão da fibra I-25 para vários comprimentos, com uma potência de excitação de 398 mW e um comprimento de onda de excitação de 980 nm.

### 3.5 Sumário

Concluída a caracterização das fibras óticas dopadas, surgem alguns pontos que são importantes sublinhar.

Começando pela atenuação das fibras, percebe-se que a fibra Bi-7 tem uma atenuação elevada que dificulta a medição de luminescência desta fibra. A fibra apresenta baixa emissão na região dos 975-1225 nm, quando utilizada uma potência de excitação de 21.5 mW em fibras de comprimentos curtos. Contudo, quando são usadas potências de excitação mais elevadas, o espectro de emissão da fibra é em tudo semelhante ao espectro do laser, não se observando emissão relevante relativa à fibra. Assim, esta fibra não tem as características necessárias para ser utilizada em amplificadores óticos ou noutro componente ótico (como por exemplo lasers). Por esta razão, esta fibra não continuará a ser utilizadas nas secções seguintes.

Foi também caracterizada a fibra HPEr-2, bem como três fibras comerciais dopadas com érbio (I-4, M-5 e I-25) com vista a comparar o desempenho da fibra que nos foi fornecida com fibras já estabelecidas no mercado. Desde logo, através dos espectros de atenuação destas fibras, constata-se uma evidente semelhança entre a atenuação das fibras HPEr-2 e I-25. Estas não só apresentam um perfil de atenuação idêntico como também os valores desta atenuação são semelhantes. Já as fibras I-4 e M-5 têm um perfil de atenuação semelhante entre si, mas bastante diferente do da fibra HPEr-2. As semelhanças entre as fibras HPEr-2 e I-25 foram também visíveis nos testes de fotoluminescência, quer para potências de excitação baixas quer para as mais elevadas. Estas duas fibras apresentam ainda emissão na banda L quando utilizados comprimentos de fibra superiores. Fica assim evidente que a fibra I-25 é um bom termo de comparação relativamente à fibra HPEr-2 e será utilizada como tal nas secções seguintes. A emissão verificada para a fibra HPEr-2 apresenta algumas características importantes para o fabrico de amplificadores óticos, desde logo o facto de a emissão ser bastante plana na região onde atinge o seu máximo e apresentar uma emissão larga, desde a banda C até à banda L, para comprimentos curtos. Estas características são muito procuradas em amplificadores de fibra dopada, o que nos permite concluir que a fibra HPEr-2 será indicada para servir de base a um amplificador ótico.

Foi também realizada a análise da luminescência de pré-formas de fibras óticas, mas, os resultados obtidos com estas amostras não foram conclusivos, impedindo a sua continuidade neste trabalho.

## 4. Análise comparativa do desempenho de DFAs

Como discutido no capítulo 2, neste trabalho foram montados e testados amplificadores de fibra ótica. Estes foram baseados nas fibras HPEr-2 e I-25, caracterizadas no capítulo anterior.

O desempenho dos amplificadores depende de vários parâmetros que necessitam de ser estudados e otimizados de forma a conseguir o melhor desempenho de cada amplificador. Entre estes parâmetros estão o comprimento de fibra, a potência de bombeamento utilizada ou a potência do sinal de entrada, ainda que esta depende da posição do amplificador no sistema. Estes parâmetros foram caracterizados para dois amplificadores baseados em cada uma das fibras óticas e os seus resultados são apresentados neste capítulo. Analisados esses resultados, foram retiradas as devidas conclusões e foram montados os amplificadores. O desempenho destes foi também avaliado, recorrendo ao perfil de ganho e à figura de ruído de cada um para uma gama larga de comprimentos de onda. Como referido anteriormente, existe uma comparação constante entre os resultados obtidos para cada amplificador, de forma a avaliar as vantagens e desvantagens do amplificador baseado na fibra HPEr-2.

### 4.1 Montagem experimental

Para a realização de todas as medidas foi utilizada uma montagem experimental semelhante ao esquema apresentado na figura 4.1. A fonte de bombeamento utilizada foi a mesma já usada na caracterização das fibras (secção 3.3), com um comprimento de onda de 980 nm e potência máxima de 398 mW. Utilizou-se um laser sintonizável *Anritsu*, modelo OSICS 1560, com potência de saída até 13 dBm e gama de funcionamento nas bandas C e L, como fonte de sinal de transmissão. Esta fonte estava ligada a um acoplador 99-1 % que permitia controlar a potência deste sinal, permitindo varrer a gama de potências necessária com precisão. Os sinais de bombeamento e transmissão foram injetados na fibra recorrendo a um multiplexador. Este apresenta perdas de inserção de 3 dB no sinal de bombeamento e de 0.5 dB no de transmissão. A potência de pico do sinal foi medida no final da fibra com recurso ao OSA já utilizado anteriormente.

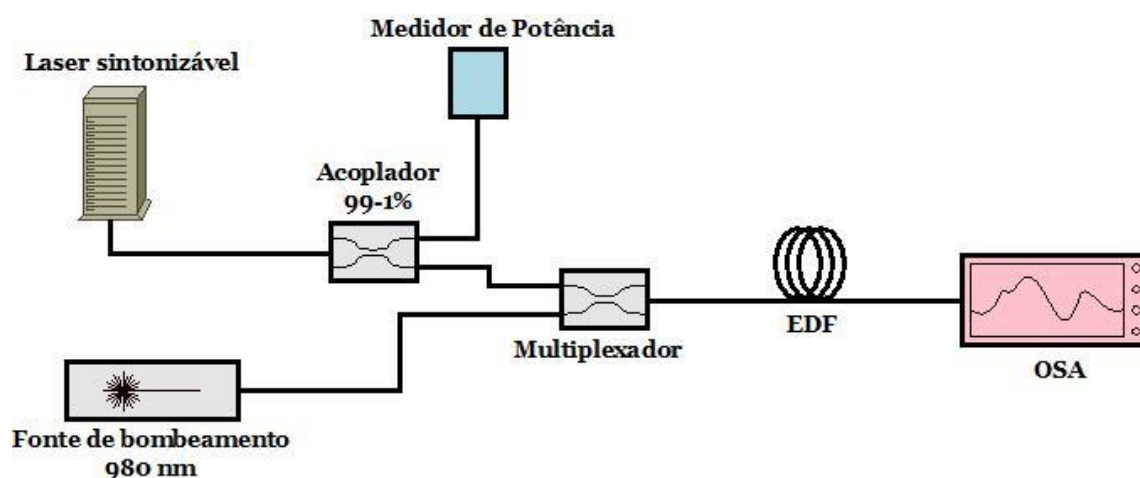


Figura 4.1 – Esquema da montagem experimental utilizada na caracterização dos amplificadores óticos.

Nas próximas secções são apresentados e discutidos os resultados de vários testes realizados para os dois amplificadores em estudo. Procurou-se que as condições experimentais se mantivessem o mais constantes possível de forma a minimizar erros experimentais que afetassem os resultados, que são a média aritmética de três medições para cada teste.

## 4.2 Dependência do ganho com a potência de bombeamento

O primeiro estudo realizado para a caracterização experimental dos amplificadores focou-se na dependência do ganho com a variação da potência de bombeamento. Para tal, foi utilizada a montagem experimental descrita anteriormente, utilizando uma potência do sinal de entrada constante de -25 dBm (*small signal*). Foram testados dois comprimentos de onda do sinal de entrada, um na banda C (1550 nm) e outro na banda L (1590 nm), uma vez que as fibras utilizadas nestes amplificadores têm emissão nestas duas bandas de comunicação e pretende-se testar a viabilidade da utilização destas fibras em amplificadores com funcionamento nas bandas C+L ou L. Utilizou-se uma gama de valores de potência de bombeamento dos 0 aos 140 mW, com um passo de 5 mW até aos 20 mW e um passo de 20 mW daí em diante. O valor máximo utilizado aqui é inferior ao limite máximo da fonte de bombeamento, devendo-se isto às perdas inserção dos vários componentes óticos em utilização. Foram testados vários comprimentos de fibra, desde 0.5 a 4 m, das fibras HPEr-2 e I-25.

A evolução do ganho com a potência de bombeamento para um sinal de entrada de 1550 nm e para vários comprimentos de fibra é apresentada na figura 4.2. Ao observar esta figura verifica-se desde logo que o ganho aumenta com o incremento da potência de bombeamento em ambos os casos. Este incremento é cada vez menor, mostrando que o valor do ganho tem tendência a estabilizar a partir de certo ponto. O aumento do ganho deve-se ao acréscimo de população no estado excitado, que é maior quanto mais elevada for a potência de bombeamento. Contudo, quando os iões de érbio estão no estado excitado em todo o comprimento de fibra, o incremento adicional da potência de bombeamento não contribui para o aumento da população deste estado, levando a uma saturação do ganho. No caso do amplificador que utiliza a fibra HPEr-2, o estado de saturação é atingido na fibra de 0.5 m, para uma potência de bombeamento de 20 mW e nas fibras com 1 m e 1.5 m para potências de bombeamento superiores a 100 mW, ainda que nunca se atinja um estado de saturação total nestas. Olhando especificamente para a fibra de 2 m, verifica-se apenas o aumento do ganho, sem haver sinal de saturação com as potências injetadas. Significa isto que estamos ainda longe da potência de saturação para este comprimento de fibra. No caso da fibra de 3 m não é medido qualquer ganho, verificando-se apenas atenuação. O valor máximo do ganho é ~25 dB e é obtido com a fibra de 1 m.

O amplificador baseado na fibra I-25 atinge um valor de ganho máximo de ~32 dB para a fibra com 2 m de comprimento. Verifica-se que a saturação começa a ser atingida para um valor de potência de bombeamento de 20 mW na fibra com 0.5 m, para uma potência de 40 mW na fibra de 1 m e para potências acima dos 40 mW nos restantes comprimentos, sendo essa potência diferentes em todos. No caso da fibra de 4 m não é atingido o estado de total saturação como acontece para os restantes comprimentos de fibra.

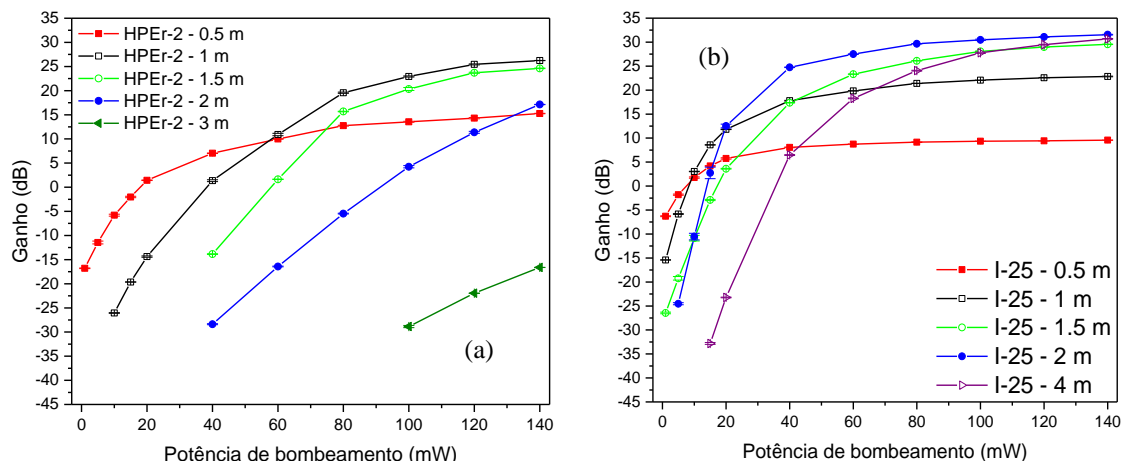


Figura 4.2 – Variação do ganho em função da potência de bombeamento para vários comprimentos das fibras HPER-2 (a) e I-25 (b), usando um sinal de entrada de -25 dBm, com um comprimento de onda de 1550 nm.

Foi também realizado este estudo para uma potência de sinal de entrada de 0 dBm (regime de saturação, referido no capítulo 2). As potências de bombeamento analisadas foram as mesmas assim como todas as condições experimentais. Visto que, para o amplificador baseado na fibra HPER-2, o comprimento de fibra com maior ganho era 1 m, escolheu-se utilizar este para a realização destas medidas. Por uma questão de coerência foi também utilizado este comprimento de fibra nas medidas relativas ao amplificador baseado na fibra I-25. Estes resultados são apresentados e comparados aos obtidos para o sinal com potência -25 dBm. Observando as figuras 4.3 (a) e (b), verifica-se que o comportamento do ganho está de acordo com o esperado. Em ambos, os casos a curva de ganho relativa ao sinal de 0 dBm satura para um valor de potência de bombeamento muito inferior. Isto acontece pois, como o sinal de entrada tem uma potência superior, há um maior número de fótons a amplificar, levando a que haja uma depleção da população de iões de érbio no estado excitado, para realizar a amplificação.

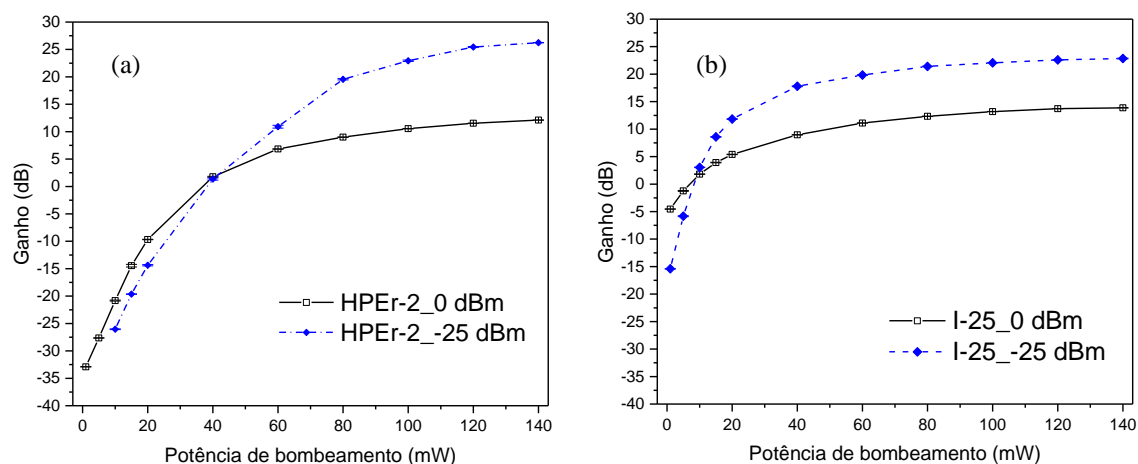


Figura 4.3 – Variação do ganho em função da potência de bombeamento para as fibras HPER-2 (a) e I-25 (b) de 1 m, usando um sinal de entrada de 1550 nm, com potências de -25 e 0 dBm.

De forma a caracterizar e otimizar o funcionamento dos amplificadores aproveitando toda a gama de funcionamento das fibras utilizadas, foi realizado o mesmo estudo para um sinal de entrada com comprimento de onda de 1590 nm. A potência do sinal de entrada foi mantida constante, no valor de -25 dBm e as potências de bombeamento testadas foram as mesmas das medidas anteriores. Para a fibra HPER-2 foi também analisada uma fibra com 4 m de comprimento, porque, como verificado anteriormente, fibras com comprimentos superiores apresentam emissão na banda L.

Na figura 4.4 (a) são apresentados os resultados relativos ao amplificador baseado na fibra HPER-2. O comportamento geral do ganho é semelhante ao verificado anteriormente, ou seja, quanto maior a potência de bombeamento maior o ganho obtido. Verifica-se também a tendência para a saturação deste ganho, sem que esta seja totalmente atingida. A saturação do ganho começa a ser atingida para potências de bombeamento superiores a 60 mW nos comprimentos de 1, 1.5 e 2 m, enquanto para a fibra de 0.5 m começa a atingir-se esse estado para uma potência de bombeamento de 20 mW. Nas fibras de 3 e 4 m, observa-se que a saturação ainda está longe de ocorrer para as potências de bombeamento usadas. O valor máximo de ganho atingido neste caso é de ~13 dB, para a fibra com 1.5 m. Um ponto a notar nestes resultados é verificado para a fibra de 3 m, que para o sinal de 1550 nm não apresentava qualquer ganho, verificando-se para o sinal de 1590 nm um ganho de ~7.5 dB. Na fibra de 4 m é perceptível um comportamento semelhante ao observado nos outros comprimentos, no entanto esta apresenta apenas perdas. Para este comprimento de fibra, a potência de bombeamento é insuficiente para conseguir excitar a fibra em todo o seu comprimento. Apenas os iões presentes no início da fibra são excitados e a sua emissão é absorvida no restante comprimento da fibra, diminuindo o ganho à saída. Se se estabelecer uma comparação entre estes resultados e os resultados para o sinal de entrada de 1550 nm observa-se a saturação do ganho para uma potência de bombeamento inferior sendo o valor máximo de ganho obtido é muito inferior ao medido para o sinal de entrada de 1550 nm.

Na figura 4.4 (b) apresenta-se os resultados utilizando a fibra I-25. Verifica-se que o ganho para este sinal de entrada também diminui significativamente em relação ao sinal de 1550 nm, algo que já era esperado e que está de acordo com o que sucedeu para a fibra HPER-2, sendo agora o ganho máximo obtido de ~16 dB, próximo do ganho máximo obtido na figura 4.4 (a). O comportamento do ganho para os vários comprimentos de fibra é semelhante ao observado para o sinal de 1550 nm, sendo que neste caso, é a fibra de 4 m que apresenta o maior ganho. Esta é também a fibra que satura para uma potência de bombeamento superior (60 mW) enquanto os restantes comprimentos de fibra começam a saturar para potências de bombeamento de 20 mW.

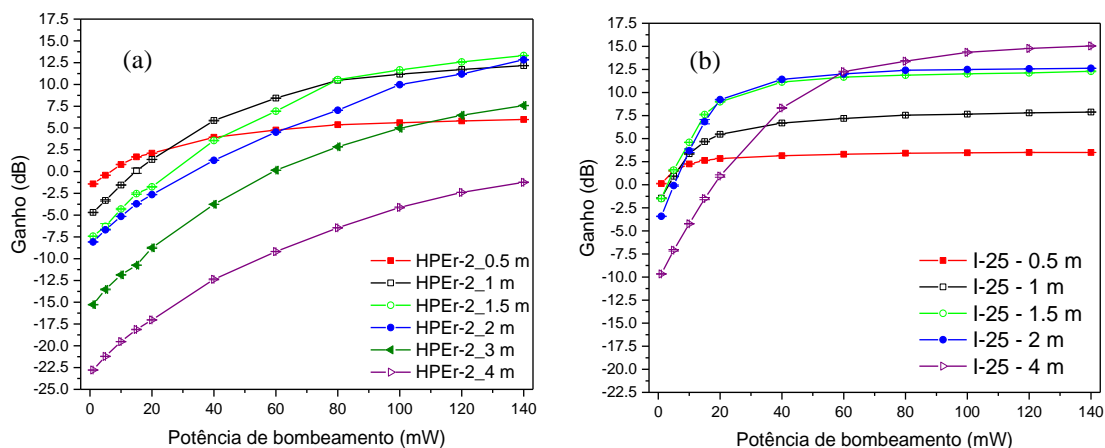


Figura 4.4 – Variação do ganho em função da potência de bombeamento para vários comprimentos das fibras HPER-2 (a) e I-25 (b), usando um sinal de entrada de -25 dBm, com um comprimento de onda de 1590 nm.



De acordo com o que foi realizado para o sinal de entrada de 1550 nm, também neste caso foi estudado o comportamento do ganho com a potência de bombeamento utilizando uma potência de sinal de entrada de 0 dBm, fazendo-se a comparação com o sinal de -25 dBm. Tal como anteriormente, foi selecionado o comprimento para o qual o amplificador baseado na fibra HPER-2 apresentava o melhor desempenho, sendo neste caso 1.5 m.

Os resultados são apresentados na figura 4.5. O comportamento do ganho para as várias potências de bombeamento está de acordo com o verificado na figura 4.4, ou seja, não é atingida a saturação completa na fibra HPER-2, algo que se verifica para a fibra I-25. Observa-se que a diferença entre os valores máximos de ganho atingido para as duas potências de sinal de entrada é menor do que o verificado para o sinal de 1550 nm, sendo agora cerca de 3 dBm na fibra HPER-2 e aproximadamente 2 dBm no caso da fibra I-25, isto é compreensível uma vez que em geral, o ganho máximo dos amplificadores é de 13.3 dB para a fibra HPER-2 e de 12.3 dB para a fibra I-25, sendo estes valores muito inferiores ao verificado anteriormente para um sinal de 1550 nm.

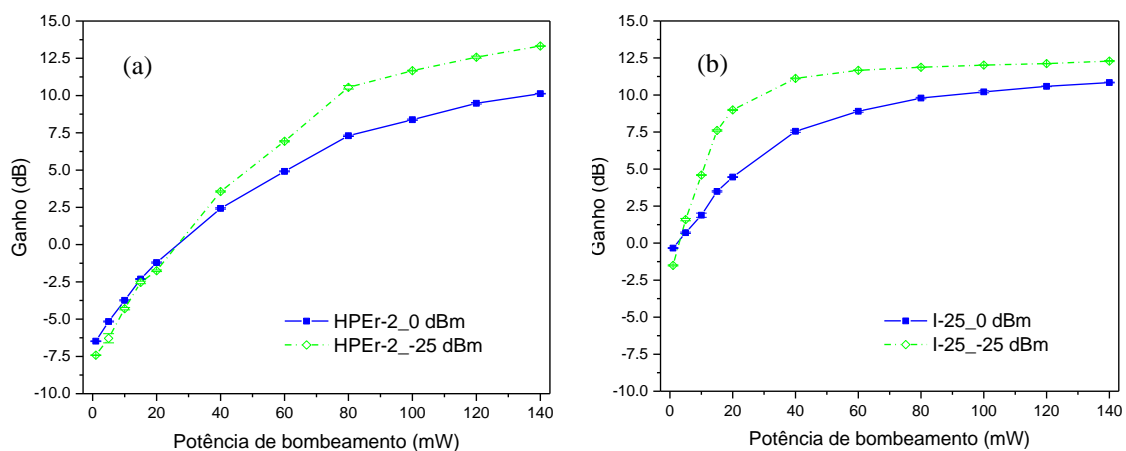


Figura 4.5 – Variação do ganho em função da potência de bombeamento para as fibras HPER-2 (a) e I-25 (b) de 1.5 m, usando um sinal de entrada de 1590 nm, com potências de -25 e 0 dBm.

### 4.3 Dependência do ganho com a potência do sinal de entrada

Outro estudo realizado para caracterizar os amplificadores foi a dependência do ganho com a variação da potência do sinal de entrada, para uma potência de bombeamento constante. Este estudo foi realizado para vários comprimentos de fibra, de forma a determinar o comprimento ótimo de fibra a utilizar em cada amplificador. Para isto foi utilizada a montagem experimental esquematizada na figura 4.1, recorrendo a uma potência de bombeamento de 100 mW. Optou-se por não utilizar potências superiores a este valor uma vez que a fonte de bombeamento apresentava algumas oscilações de sinal para potências mais elevadas o que levaria a maiores erros experimentais e, como visto anteriormente, para esta potência de bombeamento, o ganho estava praticamente saturado em todos os comprimentos de fibra. As potências de sinal de entrada testadas variaram desde -40 até 5 dBm com um passo de 2.5 dBm, e, foram testados sinais com dois comprimentos de onda, 1550 e 1590 nm, para comprimentos de fibra entre 1 e 4 m.

Na figura 4.6 são apresentados os resultados obtidos, onde se verifica um comportamento comum a todos os comprimentos testados de ambas as fibras. Para sinais menores, o ganho apresenta-se estável em torno do valor máximo, diminuindo acentuadamente quando atingida a potência de saturação. Relativamente à fibra HPER-2, foram testados três comprimentos, 1, 1.5 e 2 m, não sendo possível medir o sinal à saída para comprimentos superiores. Pela análise dos resultados

da fibra HPEr-2 (figura 4.6 (a)), verifica-se que, de acordo com o medido anteriormente a fibra de 1 m apresenta o valor de ganho mais elevado (26.6 dB), sendo a sua potência de saturação de -17.5 dBm. É de realçar que neste caso, a fibra de 2 m apresenta um comportamento distinto das restantes, uma vez que o valor do ganho diminui ligeiramente desde o início. Este comportamento talvez se deva ao facto desta fibra não estar totalmente na zona de saturação do sinal de bombeamento para o valor de potência de bombeamento usado. Fazendo uma análise semelhante para os resultados obtidos para a fibra I-25, presentes na figura 4.6 (b), observa-se que todos os comprimentos apresentam uma região de ganho estável antes de atingirem a saturação. Tal como verificado anteriormente, a fibra com valor de ganho mais elevado é a de 2 m (32.5 dB), sendo a sua potência de saturação de -20 dBm. As restantes fibras saturam para o mesmo valor de potência, à exceção da fibra de 1 m que atinge a saturação para potências de -10 dBm.

Este comportamento do ganho, mais elevado e constante para potências de sinal mais baixas está diretamente relacionado com a inversão da população. Para baixas potências, o sinal de transmissão é composto por menos fótons, não afetando de maneira significativa a população de iões de érbio no estado excitado durante a amplificação. À medida que se aumenta a potência do sinal de entrada, este passa a ter mais fótons, obrigando a uma depleção elevada da população do estado excitado de forma a garantir a amplificação que, conseqüentemente, diminui o valor do ganho do amplificador.

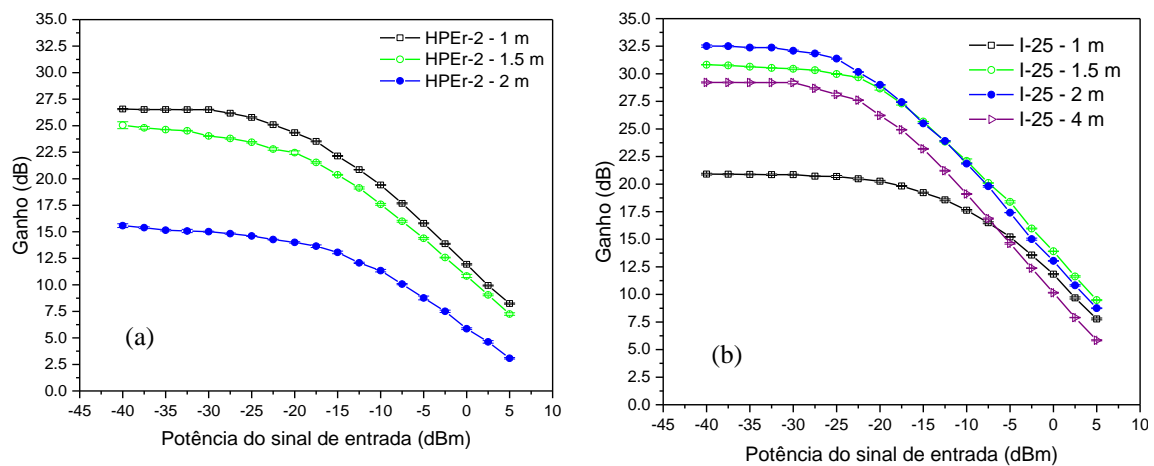


Figura 4.6 – Variação do ganho em função da potência do sinal de entrada para vários comprimentos das fibras HPEr-2 (a) e I-25 (b), usando uma potência de bombeamento de 100 mW, com um comprimento de onda de 1550 nm.

Estes resultados estão de acordo com o verificado nas medidas de variação da potência de bombeamento, sendo os valores de ganho semelhantes, e ocorrendo para os mesmos comprimentos de fibra. Os resultados são também concordantes com o medido anteriormente ao nível da saturação, com esta a apresentar valores semelhantes para os vários comprimentos de fibra em ambos os testes. Isto reforça a ideia de que cada amplificador tem um comprimento de fibra ótimo. No caso da fibra HPEr-2 esse comprimento é de 1 m enquanto para a fibra I-25 o comprimento ótimo será, por esta análise, de 2 m para um sinal de entrada de 1550 nm.

Estas medidas foram também realizadas utilizando um sinal de entrada com um comprimento de onda de 1590 nm, sendo os resultados apresentados na figura 4.7. Tal como sucedeu anteriormente, também aqui o valor máximo do ganho é inferior em relação aos resultados obtidos para o sinal de 1550 nm, sendo de 11.4 dB para a fibra HPEr-2 de 1.5 m e de 14.9 dB para a fibra I-25 de 4 m. Apesar desta diferença no valor do ganho, o comportamento geral deste é em tudo

semelhante ao verificado anteriormente, ou seja, todos os comprimentos de ambas as fibras apresentam uma região de ganho estável, diminuindo acentuadamente quando atingida a saturação para potências acima dos 0 dBm. Este comportamento não se verifica apenas na fibra I-25 de 4 m, onde se observa uma diminuição do valor do ganho para uma potência de -27.5 dBm. Esta variação deve-se à forma como as medidas foram obtidas, que obrigavam a um ajuste do atenuador usado nesta zona, causando uma oscilação no valor do ganho. Ainda assim, esta oscilação não tem consequências significativas nos resultados obtidos.

Estes resultados estão de acordo com o que foi medido na variação da potência de bombeamento, quer a nível do valor máximo de ganho atingido, quer a nível do comprimento de fibra no qual este é maximizado. Para este caso de um sinal de entrada na banda L, os comprimentos ótimos de cada fibra variam, sendo de 1.5 m para a fibra HPEr-2 e de 4 m para a fibra I-25. O aumento do comprimento de fibra ótimo para um sinal deste tipo era esperado, uma vez que, de forma a obter amplificação na banda L é necessária maior população de iões de érbio. O mesmo acontece com a fibra HPEr-2, que, como já demonstrado, apresenta muitas semelhanças com a fibra I-25, sendo possível assumir que o seu comportamento será próximo desta fibra comercial. Contudo, verifica-se que para a fibra I-25 o comprimento ótimo, para estas condições, aumentou de 2 para 4 m, enquanto na fibra HPEr-2 aumentou apenas de 1 para 1.5 m.

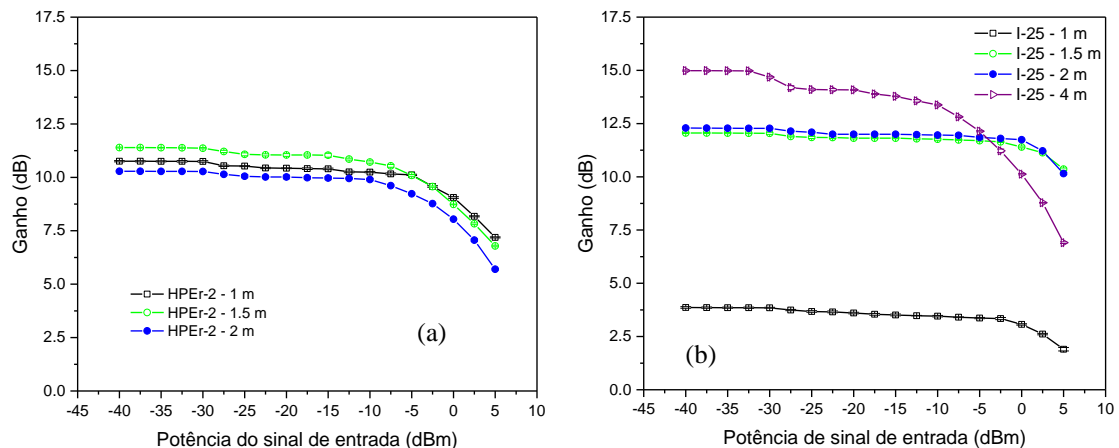


Figura 4.7 – Variação do ganho em função da potência do sinal de entrada para vários comprimentos das fibras HPEr-2 (a) e I-25 (b), usando uma potência de bombeamento de 100 mW, com um comprimento de onda de 1590 nm.

## 4.4 Ganho e figuras de ruído

Com a informação obtida nas medidas anteriores, definiram-se alguns dos parâmetros dos amplificadores em estudo e excluíram-se alguns comprimentos de fibra que não apresentavam resultados positivos. Contudo, estes amplificadores ainda não estão completamente caracterizados, faltando avaliar o seu perfil de ganho e a sua figura de ruído para vários comprimentos de onda. Para esta caracterização foi medido o ganho e as figuras de ruído de cada amplificador para vários comprimentos de fibra e comprimentos de onda do sinal de entrada. Foi utilizada uma potência de bombeamento de 100 mW (valor escolhido pelas razões já referidas), visto ser um valor para o qual os amplificadores apresentam bons resultados. O amplificador foi caracterizado para 20 sinais de entrada com uma potência -25 dBm, numa gama de comprimentos de onda desde os 1515 aos 1620 nm cobrindo a banda C+L, tendo sido injetado na fibra um comprimento de onda de cada vez.

A análise do perfil de ganho e das figuras de ruído dos amplificadores foi realizada individualmente, sendo depois comparados os melhores resultados de cada um.

Começou-se por estudar o amplificador baseado na fibra HPEr-2, os comprimentos de fibra testados foram de 1, 1.5, 3 e 4 m, apesar de se saber à partida que para estes dois últimos não seria medido um ganho efetivo devido à potência de bombeamento insuficiente. O perfil de ganho para os vários comprimentos de fibra testados é apresentada na figura 4.8 (a). Para a fibra com 1 m observa-se que o ganho de valor mais elevado se estende por uma região larga de aproximadamente 35 nm entre 1525 e 1560 nm mantendo-se plana e constante em torno do mesmo valor de ganho, ~25 dB. Aumentando o comprimento da fibra para 1.5 m verifica-se uma diminuição acentuada do ganho até 1540 nm em relação à fibra de 1 m, aparecendo a região de maior ganho em torno dos 1560 nm. Contudo o valor máximo de ganho para esta fibra é de apenas 21.4 dB. Para comprimentos de onda na banda L ambos os comprimentos de fibra apresentam um comportamento semelhante, verificando-se uma diminuição do valor do ganho até ao final da gama de comprimentos de onda estudada.

Na figura 4.8 (b) é apresentada a figura de ruído dos amplificadores. De acordo com o esperado, verifica-se que o ruído para as fibras de 3 e 4 m é muito elevado, uma vez que o ganho é muito baixo para tais comprimentos. Já para a fibra de 1 m, o valor do ruído é bastante baixo, apresentando um valor máximo de 4.6 dB para os 1530 nm, comprimento de onda correspondente ao valor máximo do ganho. A partir daí o ruído é bastante estável em torno dos 3.5 dB, apresentando uma ligeira diminuição no seu valor até ao final do teste. No caso da fibra de 1.5 m, verifica-se que o valor máximo do ruído surge para um comprimento de onda de 1515 nm (7.5 dB), apresentando a partir daí um comportamento semelhante ao verificado para a fibra de 1 m, tendo um valor médio de ~3.6 dB. É de destacar que ao longo da região 1530-1610 nm o ruído relativo à fibra de 1.5 m tem sempre um valor superior ao verificado para a fibra de 1 m, algo que era esperado visto que o ganho da fibra de 1.5 m é inferior nesta gama de valores.

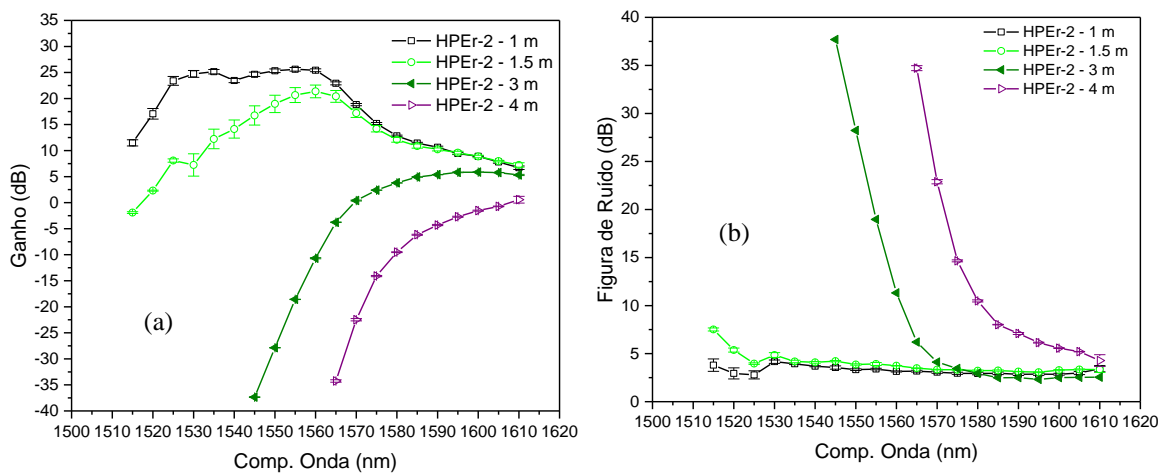


Figura 4.8 – Perfil de ganho (a) e figura de ruído (b) da fibra HPEr-2 para vários comprimentos de onda do sinal de entrada e vários comprimentos de fibra, usando uma potência de bombeamento de 100 mW e uma potência de sinal de entrada de -25 dBm.

Fazendo a mesma análise para a fibra I-25, foram testados três comprimentos de fibra (1.5, 2 e 4 m), uma vez que foram os comprimentos que apresentaram os melhores resultados nos outros testes realizados. Na figura 4.9 são apresentados o perfil de ganho (a) e as figuras de ruído (b) do amplificador para os vários comprimentos de fibra. Verifica-se que existem semelhanças entre as fibras com 1.5 e 2 m, quer em termos do valor de ganho quer no seu comportamento na gama de

comprimentos de onda analisados. Verifica-se que a região de maior amplificação se situa entre os 1525 e os 1560 nm, obtendo-se o valor máximo do ganho, de  $\sim 34.5$  dB, aos 1530 nm e sendo sensivelmente o mesmo para ambos os comprimentos. A diferença entre estes dois comprimentos reside no comportamento da figura de ruído. A forma geral da figura de ruído é muito semelhante em ambos os comprimentos. A fibra de 2 m apresenta um ruído máximo de 3.7 dB, medido para um sinal de entrada de 1530 nm, valor que vai diminuindo ao longo da gama de comprimentos de onda analisada, perfazendo um valor médio de ruído de  $\sim 3.5$  dB. Já a fibra com 1.5 m apresenta um valor máximo de ruído de 3.3 dB, obtido para o mesmo comprimento de onda do sinal de entrada. Também neste caso o valor do ruído diminui ao longo da gama analisada sendo que o valor médio deste é de  $\sim 2.5$  dB. A fibra de 2 m apresenta um ganho ligeiramente superior entre os 1545-1560 nm (0.2 dB de diferença), mas o desempenho da fibra de 1.5 m ao nível da figura de ruído acaba por compensar este detalhe, permitindo-nos concluir que, para os comprimentos testados, a melhor escolha será a fibra de 1.5 m.

Em relação à fibra de 4 m, verifica-se um comportamento semelhante ao medido na fibra HPER-2 de 2 m, ou seja, a região com maior ganho é muito estreita relativamente às fibras de menor comprimento, o valor máximo deste é também inferior (28.6 dB), sendo este valor atingido numa região muito mais próxima da banda C+L para um comprimento de onda de 1560 nm. Já o valor de ruído é muito elevado na região onde a amplificação é baixa, tal como sucedeu para a fibra HPER-2. Quando a fibra já apresenta ganho positivo, a figura de ruído diminui para valores entre os 2 e os 4 dB. Ao contrário dos dois outros casos, a figura de ruído para este comprimento de fibra é bastante irregular, apresentando um pico nos 1530 nm onde atinge um valor de 4.15 dB, diminuindo de seguida para valores ligeiramente acima dos 3 dB na região dos 1540-1560 nm. A partir daqui toma valores ainda mais baixos dos 1565 aos 1600 nm. Estes valores de ganho e ruído são satisfatórios e mostram-nos que, de facto, um amplificador baseado nesta fibra com 1.5 m terá um bom desempenho se for utilizado com as devidas condições.

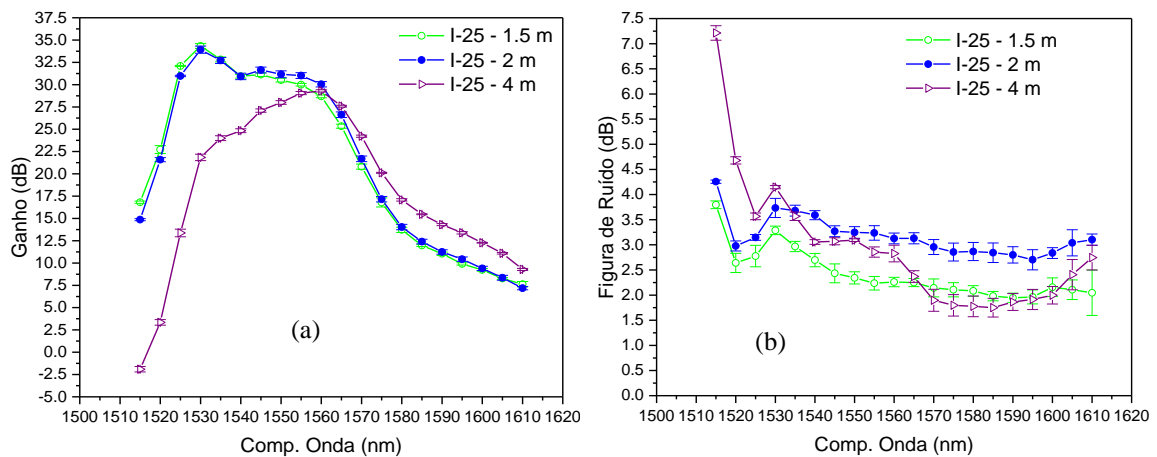


Figura 4.9 – Perfil de ganho (a) e figura de ruído (b) da fibra I-25 para vários comprimentos de onda do sinal de entrada e vários comprimentos de fibra, usando uma potência de bombeamento de 100 mW e uma potência de sinal de entrada de -25 dBm.

De forma a avaliar as vantagens e desvantagens de um amplificador baseado na fibra HPER-2, compararam-se os resultados obtidos para este com o que foi obtido para o amplificador baseado na fibra I-25. Foram escolhidos os comprimentos de cada fibra com melhores resultados de amplificação e sobrepostos os respetivos perfis de ganho e figuras de ruído. Na figura 4.10 (a) verifica-se que ambas as fibras têm a zona de maior ganho em torno da região 1525-1560 nm, tendo a fibra I-25 um

ganho máximo superior (34.5 dB) que surge para um comprimento de onda de 1530 nm, em relação à fibra HPER-2 que tem um ganho máximo de 25 dB. Contudo, a fibra HPER-2 apresenta um ganho mais plano ao longo de toda a região de maior amplificação.

Fazendo a comparação entre as figuras de ruído de ambas as fibras, apresentada na figura 4.10 (b), voltam-se a verificar semelhanças no comportamento das fibras. Ambas apresentam um mínimo na figura de ruído para um comprimento de onda de 1525 nm, seguido de um pico no valor do ruído aos 1530 nm com a fibra HPER-2 a ter um valor mais elevado (4.16 dB) em relação à fibra I-25 (3.7 dB). Daí em diante o ruído das fibras diminuí progressivamente, voltando a aumentar para os 1605 e 1610 nm. Ao longo de toda a gama de comprimentos de onda, o valor do ruído da fibra HPER-2 é superior (1 dB em média), mas, contudo esta diferença não impede a utilização e o bom desempenho do amplificador.

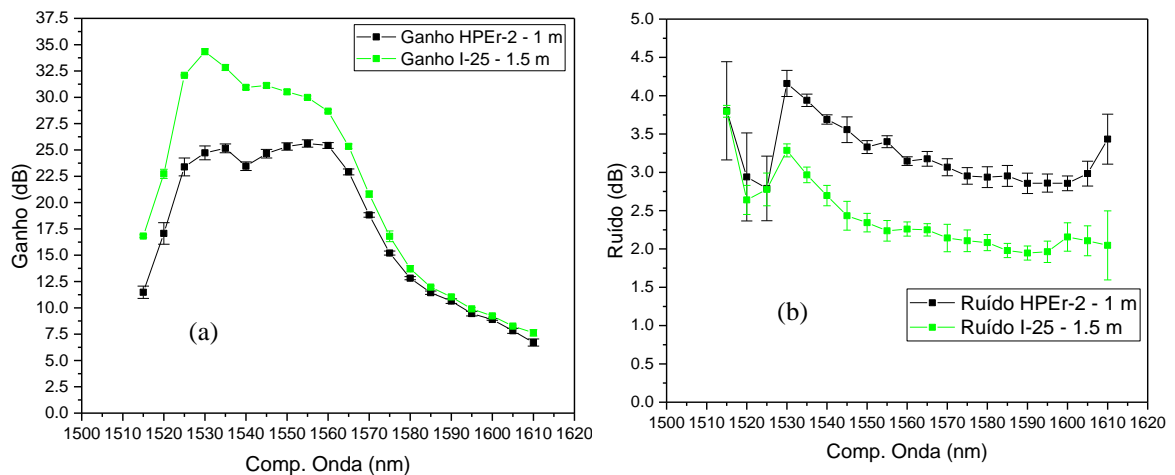


Figura 4.10 – Comparação entre o perfil de ganho (a) e figura de ruído (b) das fibras HPER-2 e I-25 com 1 e 1.5 m, respetivamente, usando uma potência de bombeamento de 100 mW e uma potência de sinal de entrada de -25 dBm.

Apesar da diferença entre os valores de ganho ser significativa (cerca de 10 dB), através desta comparação confirma-se que a fibra HPER-2 obtém desempenhos semelhantes à fibra I-25 utilizando comprimentos de fibra inferiores, o que representa uma vantagem importante, uma vez que um comprimento de fibra menor facilita a montagem do amplificador e diminui o risco de aparecimento de defeitos no dispositivo. Se o custo de fabrico da fibra HPER-2 for semelhante ao da fibra I-25, esta capacidade representa também uma diminuição do custo. Além disso a HPER-2 apresenta um ganho mais plano o que é um ponto crucial no desempenho de amplificadores óticos em sistemas WDM. Um ganho plano permite uma amplificação equalizada de sinais com vários comprimentos de onda, evitando um acréscimo de ruído ao sinal de transmissão.

## 4.4 Sumário

Ao longo deste capítulo, caracterizou-se amplificadores baseados na fibra HPER-2 e na fibra comercial I-25, comparando os seus desempenhos.

Começou-se por avaliar a dependência do ganho de cada fibra com a potência de bombeamento utilizada. Verificaram-se diferenças no comportamento das duas fibras. A fibra I-25 atinge a saturação para potências de bombeamento inferiores (40 mW para o sinal de entrada de

1550 nm) enquanto a fibra HPEr-2 não chega a saturar totalmente para nenhuma das potências de bombeamento utilizadas. Isto deixa em aberto a possibilidade de utilização de potências de bombeamento superiores nesta fibra, o que pode levar um desempenho superior no que ao ganho obtido diz respeito. Este comportamento por parte da fibra HPEr-2 acaba por ser confirmado nos testes realizados para a dependência do ganho com a potência do sinal de entrada. Verifica-se que para comprimentos de fibra superiores o valor do ganho é muito baixo e os resultados não podem ser comparados com os obtidos para comprimentos até 2 m. Assim, a amplificação nas bandas C+L e L que se esperava atingir com esta fibra não é conseguida. Já a fibra I-25 apresenta valores de ganho de acordo com o medido anteriormente para todos os comprimentos de fibra testados apresentando portanto uma maior consistência no seu desempenho.

Foram também obtidos o perfil de ganho e figura de ruído para amplificadores baseados em ambas as fibras. Estes resultados permitiram esclarecer quais os comprimentos ótimos a utilizar em cada um dos casos, dentro dos comprimentos testados. Tendo em conta os resultados obtidos concluiu-se que no caso da fibra HPEr-2 o comprimento ótimo é de 1 m e no caso da fibra I-25, o comprimento ótimo é de 1.5 m.

Foi também comparado o desempenho dos amplificadores que utilizaram os comprimentos ótimos escolhidos para cada fibra, de forma a definir quais as vantagens e desvantagens de cada um. Ambas as fibras apresentam uma região de amplificação semelhante, dos 1525-1560 nm. Em relação ao ganho, o amplificador baseado na fibra I-25 (1.5 m) apresentou um valor superior (34.5 dB) contra os 25 dB obtidos com a fibra HPEr-2 (1 m). No entanto, o ganho da fibra HPEr-2 apresenta-se mais plano ao longo da região de ganho mais elevado, enquanto o ganho da fibra I-25 tem um pico de amplificação situado nos 1530 nm, tendo uma zona plana entre os 1540-1560 nm. Em relação ao ruído, verifica-se que a fibra HPEr-2 tem um valor de ruído superior ao longo de toda a região de amplificação, tendo um valor máximo de 4.16 dB e um valor médio de ~3.5 dB. Já para a fibra I-25 verifica-se um valor máximo de ruído de 3.3 dB e um valor médio de ~2.5 dB, representando um desempenho superior.

É de realçar que a fibra HPEr-2 demonstra desempenhos aproximados aos obtidos com a fibra I-25 mas necessita de comprimentos de fibra menores para tal, o que acaba por ser uma vantagem na montagem de um sistema de comunicação.





# 5. Considerações Finais

## 5.1 Conclusões

Foi realizado um estudo em amostras de pré-formas fornecidas no âmbito do projeto de colaboração entre a Universidade de Aveiro e o *Central Glass & Ceramic Research Institute*. Contudo, os resultados foram inconclusivos pelo que seria necessário melhorar a configuração experimental utilizada ou considerar uma abordagem diferente.

Seguidamente, foram caracterizadas as duas fibras óticas dopadas fornecidas no âmbito do mesmo projeto e, além destas, foram também estudadas outras três fibras dopadas apenas com érbio comercialmente disponíveis. Estas foram escolhidas com o intuito de servirem como termo de comparação para uma das fibras que foi fornecida. Ao longo da caracterização, verificou-se que apenas uma dessas fibras (I-25) tinha de facto características semelhantes a uma das fibras a caracterizar e, como tal, as restantes fibras comerciais acabaram por ser descartadas.

Com a evolução da caracterização, observou-se que uma das fibras em estudo, HPEr-2, tinha potencialidades de amplificação. Assim foi montado e caracterizado um amplificador ótico baseado nesta fibra. Foi também estudado um amplificador baseado na fibra I-25, mais uma vez com o objetivo de avaliar as vantagens e desvantagens da fibra HPEr-2 em relação a um produto já existente no mercado.

Na primeira caracterização das fibras, começou-se por estudar a sua atenuação. Verificou-se que na fibra Bi-7 eram obtidos valores de atenuação elevados ao longo de uma região larga de comprimentos de onda, sem que existam bandas bem definidas. Em relação à fibra HPEr-2, verifica-se a existência de duas bandas com atenuação elevada e uma outra região com alguma atenuação. Este comportamento foi também observado na fibra I-25. Já para as outras duas fibras comerciais (M-5 e I-4) a atenuação também evidencia as zonas de absorção, mas em geral, em toda a gama espectral analisada apresentou valores baixos.

Foi estudada também a emissão destas fibras quando sujeitas a potências de excitação baixas, para vários comprimentos (curtos) de fibra. Na fibra dopada com bismuto esperava-se obter luminescência numa região próxima dos 1100 nm, o que foi verificado, contudo, era também esperada emissão próximo dos 700 nm, algo que não foi conseguido. No que diz respeito às fibras HPEr-2 e I-25, observou-se uma luminescência semelhante em ambas para valores próximos dos 1550 nm. A intensidade desta luminescência era maior para as potências mais elevadas e para os comprimentos mais curtos. Esta luminescência foi também medida para as fibras M-5 e I-4, contudo, para estas a intensidade da emissão aumentava com o comprimento de fibra utilizado. Isto confirmou as diferenças entre estas fibras e a fibra HPEr-2 e como tal, levou-nos a concluir que estas não seriam um bom termo de comparação.

De forma a completar a caracterização, procedeu-se ao estudo de emissão das fibras para potências mais elevadas. O comprimento de onda do laser de excitação utilizado foi de 980 nm (diferente do utilizado para o estudo a baixas potências), visto ser este o valor associado à maior absorção da fibra. Neste teste, para a fibra Bi-7 não foi medida qualquer emissão relativa à mesma nos vários comprimentos testados. Esta inexistência de emissão leva-nos a concluir que não será possível utilizar esta fibra num amplificador ótico e como tal esta foi descartada. Em relação à fibra HPEr-2, foi medida emissão desta na mesma região onde tinha surgido luminescência anteriormente. Verificou-se que à medida que o comprimento de fibra aumentava, a emissão tendia a deslocar-se

para comprimentos de onda correspondentes às bandas C+L e L. O mesmo comportamento foi verificado para a fibra I-25, sem que este deslocamento fosse tão evidente.

Na caracterização dos amplificadores montados, foram realizados testes de dependência do ganho com a variação da potência do sinal de bombeamento, potência do sinal de entrada, para dois sinais de entrada com comprimento de onda diferente, e foram também estudados o ganho e a figura de ruído de cada amplificador, sendo feita a comparação entre os resultados obtidos para os comprimentos ótimos de cada amplificador. Verificou-se que para a fibra I-25 o ganho satura com o aumento da potência de bombeamento, sendo esta saturação também verificada com o aumento da potência do sinal de entrada. No caso da fibra HPEr-2, a saturação não é totalmente atingida com as potências de bombeamento testadas, verificando-se um comportamento semelhante para a variação da potência do sinal de entrada.

O perfil de ganho e as figuras de ruído foram obtidos de forma a completar a caracterização dos amplificadores. Estas foram obtidas para vários comprimentos de fibra e, em conjunto com os resultados já obtidos, esclareceram quais os comprimentos de fibra ótimos a usar em cada amplificador de forma a obter o melhor desempenho possível. Foram selecionadas os comprimentos de 1 m para o amplificador baseado na fibra HPEr-2 e o 1.5 m para a fibra I-25.

Fazendo a comparação entre estes dois amplificadores, conclui-se que a fibra I-25 permite obter um ganho superior enquanto mantém uma figura de ruído semelhante (em média é até inferior) à fibra HPEr-2. Apesar disto, a fibra HPEr-2 apresenta um perfil de ganho mais plano ao longo da gama de amplificação, algo que representa uma enorme vantagem em dispositivos deste tipo, uma vez que evita o uso de técnicas auxiliares com este intuito. Outro ponto relevante é a capacidade da fibra HPEr-2 apresentar um desempenho semelhante ao obtido para a fibra I-25 precisando de um comprimento menor, representando uma poupança sobretudo a nível económico. É verdade que a diferença a nível de ganho ainda é considerável, mas verificou-se que a fibra HPEr-2 não atingiu completamente a saturação, pelo que, os valores de ganho obtidos podem ser melhorados.

É possível afirmar que a caracterização efetuada permite realizar uma avaliação das vantagens e desvantagens da fibra que nos foi fornecida em relação a uma fibra comercial, ainda assim, existem ainda pontos a aprofundar e melhorar que podem dar origem a resultados importantes no futuro.

## 5.2 Trabalho futuro

Num trabalho futuro que dê continuidade ao que foi desenvolvido até aqui, seria importante fazer o estudo destas fibras para potências de excitação mais elevadas, sobretudo nas fibras HPEr-2 e Bi-7. Com o uso de potências mais elevadas, seria também possível estudar o comportamento para fibras de comprimentos superiores. Isto, no caso das fibras dopadas com érbio, seria muito importante na compreensão do desempenho na banda L.

Em relação ao estudo dos amplificadores óticos, uma forma de completar a informação já obtida seria usar uma fonte de bombeamento com um comprimento de onda distinto do utilizado neste trabalho, nomeadamente nos 1480 nm.

Seria também interessante testar os amplificadores com outras configurações, em concreto a configuração bidirecional, de forma a ser possível uma melhor inversão da população e uma grande eficiência no desempenho do amplificador.

## Referências Bibliográficas

- [1] R. J. Sanferrare, "Terrestrial lightwave systems," *AT&T Tech. J.*, vol. 66, no. 1, p. 95, 1987.
- [2] B. P. C., O. N. A., and S. J. R., *Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Fundamentals and Technology*. 1999.
- [3] E. Desurvire, J. R. Simpson, and P. C. Becker, "High-gain erbium-doped traveling-wave fiber amplifier," *Opt. Lett.*, vol. 12, no. 11, p. 888, 1987.
- [4] Y. Ohishi, A. Mori, M. Yamada, H. Ono, Y. Nishida, and K. Oikawa, "Gain characteristics of tellurite-based erbium-doped fiber amplifiers for 1.5- $\mu\text{m}$  broadband amplification," *Opt. Lett.*, vol. 23, no. 4, pp. 274–276, 1998.
- [5] D. Gill, L. McCaughan, and J. C. Wright, "Spectroscopic site determinations in erbium-doped lithium niobate," *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.*, vol. 53, no. 5, pp. 2334–2344, 1996.
- [6] E. Snoeks, P. G. Kik, and A. Polman, "Concentration quenching in erbium implanted alkali silicate glasses," *Opt. Mater. (Amst.)*, vol. 5, no. 3, pp. 159–167, 1996.
- [7] L. G. Cohen, C. Lin, and W. G. French, "Tailoring zero chromatic dispersion in the 1.5-1.6  $\mu\text{m}$  low-low spectral region of single-mode fibres," *Electron. Lett.*, vol. 15, no. 12, pp. 334–335, 1979.
- [8] M. C. Paul, S. W. Harun, N. a D. Huri, a Hamzah, S. Das, M. Pal, S. K. Bhadra, H. Ahmad, S. Yoo, M. P. Kalita, a J. Boyland, and J. K. Sahu, "Performance comparison of Zr-based and Bi-based erbium-doped fiber amplifiers.," *Opt. Lett.*, vol. 35, no. 17, pp. 2882–4, 2010.
- [9] Y. Fujimoto and M. Nakatsuka, "Infrared Luminescence from Bismuth-Doped Silica Glass," *Jpn J. Appl. Phys.*, vol. 40, no. 2, pp. 279–281, 2001.
- [10] M. Peng, J. Qiu, D. Chen, X. Meng, I. Yang, X. Jiang, and C. Zhu, "Bismuth- and aluminum-codoped germanium oxide glasses for super-broadband optical amplification," *Opt. Lett.*, vol. 29, no. 17, p. 1998, 2004.
- [11] V. V. Dvoryrin, V. M. Mashinsky, E. M. Dianov, A. A. Umnikov, M. V. Yashkov, and A. N. Guryanov, "No Title," in *European Conference on Optical Communications*, 2005, pp. 25–29.
- [12] T. Haruna, M. Kakui, T. Taru, S. Ishikawa, and M. Onishi, "N," in *Optical Amplifiers and Their Applications Topical Meeting*, 2005, pp. 7–10.
- [13] J. C. Knight, T. A. Birks, P. S. J. Russel, and D. M. Atkin, "All-Silica Single-Mode Optical Fiber with Photonic Crystal Cladding," *Opt. Lett.*, no. 21, pp. 1547–1549, 1996.
- [14] J. Knight, T. Birks, D. Atkins, and P. Russel, "Pure Silica Single-Mode Fibre with Hexagonal Photonic Crystal Cladding," in *Optical Fiber Communication Conference*, 1996, p. 2.
- [15] J. Lægsgaard and A. Bjarklev, "Microstructured optical fibers - Fundamentals and applications," *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 89, no. 1, pp. 2–12, 2006.
- [16] J. M. Gee, "The Effect of Parasitic Absorption Losses on Light Trapping," in *Conference Record of the Twentieth IEEE Photovoltaic Specialists*, 1988, pp. 549–554.
- [17] D. C. Hanna, R. M. Percival, I. R. Perry, R. G. Smart, P. J. Suni, and A. C. Tropper, "An Yb-doped monomode fiber laser: broadly tunable operation from 1.010  $\mu\text{m}$  to 1.162  $\mu\text{m}$  and three-level operation at 974 nm," *J. Mod. Opt.*, no. 37, pp. 517–525, 1990.
- [18] A. Shirakawa, C. B. Olausson, M. Chen, and K. Ueda, "Power-Scalable Photonic Bandgap Fiber Sources with 167 W, 1178 nm and 14.5 W, 589 nm Radiations," *Adv. Solid State Photonics*, pp. 6–8, 2010.
- [19] E. Stiles, "New developments in IPG fiber laser technology," in *Proceedings of the 5th International Workshop on Fiber Lasers*, 2009.
- [20] J. E. Twonson, W. L. Barnes, K. P. Jedrzejewski, and S. G. Grubb, "Yb sensitised Er doped silica optical fiber with ultrahigh transfer efficiency and gain," *Electron. Lett.*, no. 27, pp. 1958–1959, 1991.
- [21] J. W. Dawson, P. H. Pax, G. S. Allen, D. R. Drachenberg, V. V. Khitrov, L. S. Kiani, N. Schenkel, and M. J. Messerly, "High gain, high power Nd<sup>3+</sup> fiber laser at 1427 nm," in *Lasers Congress*, 2016.
- [22] S. T. Davey and P. W. France, "Rare earth doped fluorozirconate glasses for fibre devices," *Br. Telecom. Technol. J.*, vol. 7, no. 1, p. 5848, 1989.
- [23] Y. Durteste and V. Vaseghi, "Amplification and lasing at 1.3  $\mu\text{m}$  in praseodymium doped fluorozirconate fibres," *IEE Electron Lett.*, vol. 27, no. 8, pp. 626–628, 1991.
- [24] T. J. Whitley, "High output power from an efficient praseodymium doped fluoride fibre amplifier," in *OSA OAA92*, 1993.

- [25] T. J. Whitley, “Noise and cross-talk characteristics of a P3+ doped fluoride fibr amplifier,” in *OSA OAA '93*, 1993.
- [26] B. M. Antipenko, A. A. Mak, O. B. Raba, K. B. Seyranyan, and T. V. Uvarova, “New lasing transition in the Tm3+ ion,” *J. Quantum Electron*, vol. 13, no. 4, pp. 558–560, 1983.
- [27] J. Y. Allain, M. Monerie, and H. Poignant, “Tunable cw lasing around 0.82, 1.48, 1.88 and 2.35  $\mu\text{m}$  in thulium-doped fluorozirconate fiber,” *Electron Lett.*, vol. 25, no. 24, pp. 1660–1662, 1989.
- [28] G. H. Rosenblatt, R. J. Ginther, R. C. Stoneman, and L. Esterowitz, “Laser emission at 1.47  $\mu\text{m}$  from fluorozirconate glass doped with Tm3+ and Tb3+,” in *Tunable Solid State Lasers*, 1989, pp. 373–376.
- [29] B. M. Antipenko, A. A. Mak, O. B. Raba, K. B. Seyranyan, and T. V. Uvarova, “New lasing transition in the Tm3+ ion,” *J. Quantum Electron*, vol. 13, no. 4, pp. 558–560, 1983.
- [30] I. Razdobreev, L. Bigot, V. Pureur, A. Favre, G. Bouwmans, and M. Douay, “Efficient all-fiber bismuth doped laser,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 90, pp. 0311031–0311033, 2007.
- [31] E. M. Dianov, V. V. Dvoryrin, V. M. Mashinsky, A. A. Umnikov, and A. N. Guryanov, “CW bismuth fiber laser,” *Quantum Electron*, vol. 35, pp. 1083–1084, 2005.
- [32] V. V. Dvoryrin, O. I. Medvedkov, V. M. Mashinsky, A. A. Umnikov, A. N. Guryanov, and E. M. Dianov, “Optical amplification in 1430–1495 nm range and laser action in Bi-doped fibers,” *Opt. Express*, vol. 16, no. 21, pp. 16971–16976, 2008.
- [33] G. Vienne, W. S. Brocklesby, R. S. Brown, Z. J. Chen, J. D. Minelly, J. E. Roman, and D. N. Payne, “Role of Aluminum in Ytterbium – Erbium Codoped Phosphoaluminosilicate Optical Fibers,” *Opt. Fibre Technol.*, vol. 2, no. 4, pp. 387–393, 1996.
- [34] S. R. Nagel and K. L. Walker, “An overview of the modified chemical vapour deposition (MCVD) progress and performance,” *IEEE J. Quantum Electron*, no. 4, pp. 459–476, 1982.
- [35] J. Stone and C. A. Burrus, “Neodymium-doped silica lasers in end pumped fiber geometry,” *Appl. Phys. Lett.*, no. 23, pp. 388–389, 1973.
- [36] J. E. Townsend, S. B. Poole, and D. N. Payne, “Solution doping technique for fabrication of rare-earth-doped optical fibers,” *Electron Lett.*, no. 23, pp. 329–331, 1987.
- [37] B. J. Ainslie, S. P. Craig, S. T. Davey, and B. Wakefield, “The fabrication, assessment and optical properties of high concentration Nd3+ and Er3+ doped silica-based fibres,” *Mater Lett.*, vol. 6, no. 5, pp. 139–144, 1988.
- [38] T. Gozen, Y. Kikukawa, M. Yoshida, H. Tanaka, and T. Shintani, “Development of high Nd3+ content VAD single-mode fiber by the molecular stuffing technique,” in *Conference on optical fibre communications*, 1988.
- [39] S. Amano, T. Yamashita, H. Tajima, I. Masuda, and T. Izumitani, “Lasing characteristics of Nd: phosphate glass fiber laser,” in *European Conference on Optical communication*, 1987.
- [40] M. Bass, C. DeCusatis, J. Enoch, V. Lakshminarayanan, G. Li, C. MacDonald, V. Mahajan, and E. V. Stryland, *Handbook of Optics*, 3rd ed. McGraw-Hill, Inc, 2009.
- [41] M. Connelly, *Semiconductor Optical Amplifiers*. Netherlands: Springer, 2002.
- [42] N. Dutta and Q. Wang, *Semiconductor Optical Amplifiers*. World Scientific Publishing Co., 2006.
- [43] C. J. Koester and E. Snitzer, “Amplification in a Fiber Laser,” *Appl. Opt.*, vol. 3, no. 10, pp. 1182–1186, 1964.
- [44] G. P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, 3rd ed. John Wiley & Sons, 2002.
- [45] A. Bjarklev, *Optical Fiber Amplifiers: Design and System Applications*, 1st ed. The Artech House Optoelectronics Library, 1993.
- [46] C. Valverde, B. Baseia, and V. S. Bagnato, “Mecanismos de alargamento de linhas espectrais atômicas,” *Rev. Bras. Ensino Física*, vol. 38, 2016.
- [47] S. Shimada and H. Ishio, *Optical Amplifiers and their Applications*, 1st ed. John Wiley & Sons, 1994.
- [48] F. I. Vasile and P. Schiopu, “The determination of the saturation power for erbium doped fiber amplifier,” *J. Optoelectron. Adv. Mater.*, vol. 6, no. 4, pp. 1207–1212, 2004.
- [49] G. Eisenstein, U. Koren, G. Raybon, T. L. Koch, J. M. Wiesenfeld, M. Wegener, R. S. Tucker, and B. I. Miller, “Large- and small-signal gain characteristics of 1.5  $\mu\text{m}$  multiple quantum well optical amplifiers,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 56, no. 13, pp. 1201–1203, 1990.
- [50] E. Desurvire, *Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Principles and Applications*. John Wiley & Sons, 1994.
- [51] A. C. Pan, I. Zanescio, and A. Moehlecke, “Industrial bifacial silicon solar cells with up-converter and PbS quantum dots,” *Energy Procedia*, vol. 44, pp. 160–166, 2014.