

INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

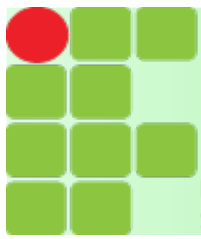
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina

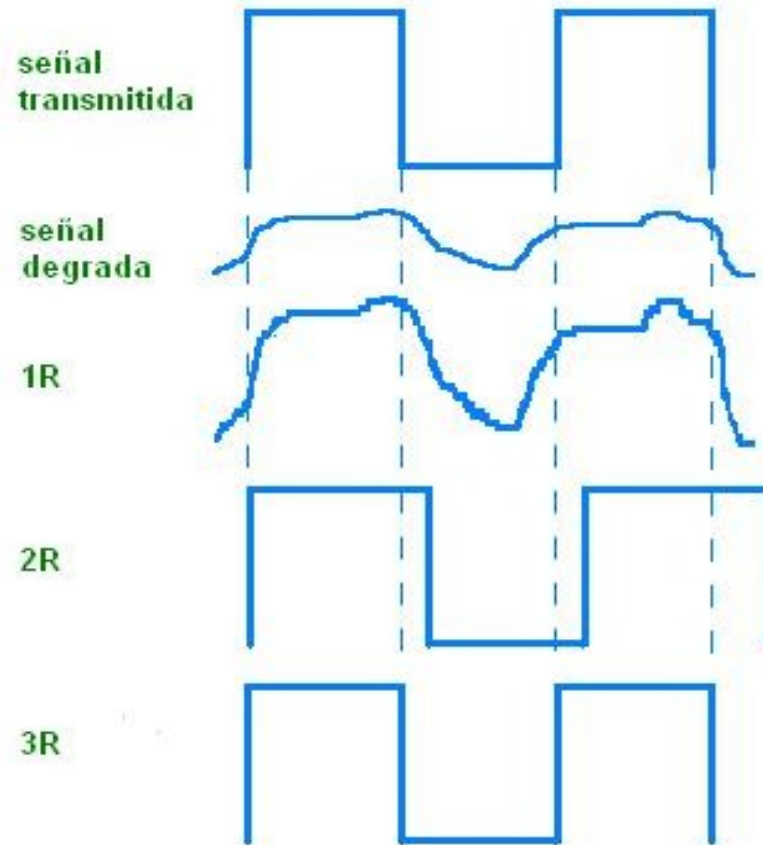
Campus São José – Área de Telecomunicações

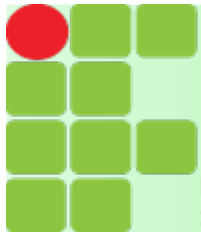
Curso Superior Tecnológico em Sistemas de Telecomunicações

Amplificadores ópticos



Amplificadores ópticos Regeneradores





Amplificadores ópticos Regeneradores

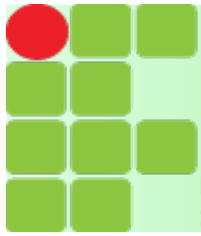
Em sistemas de transmissão os sinais sofrem distorções resultantes da atenuação e da dispersão, provocadas pelos meios de transmissão, e dos ruídos oriundos dos sistemas de telecomunicações ou de elementos externos a esses sistemas.

Para compensar essas distorções em sistemas de longa distância são utilizados regeneradores de sinais. Estes são classificados em função de como atuam no sinal transmitido.

1R – apenas amplificam o sinal sem reformatá-los.

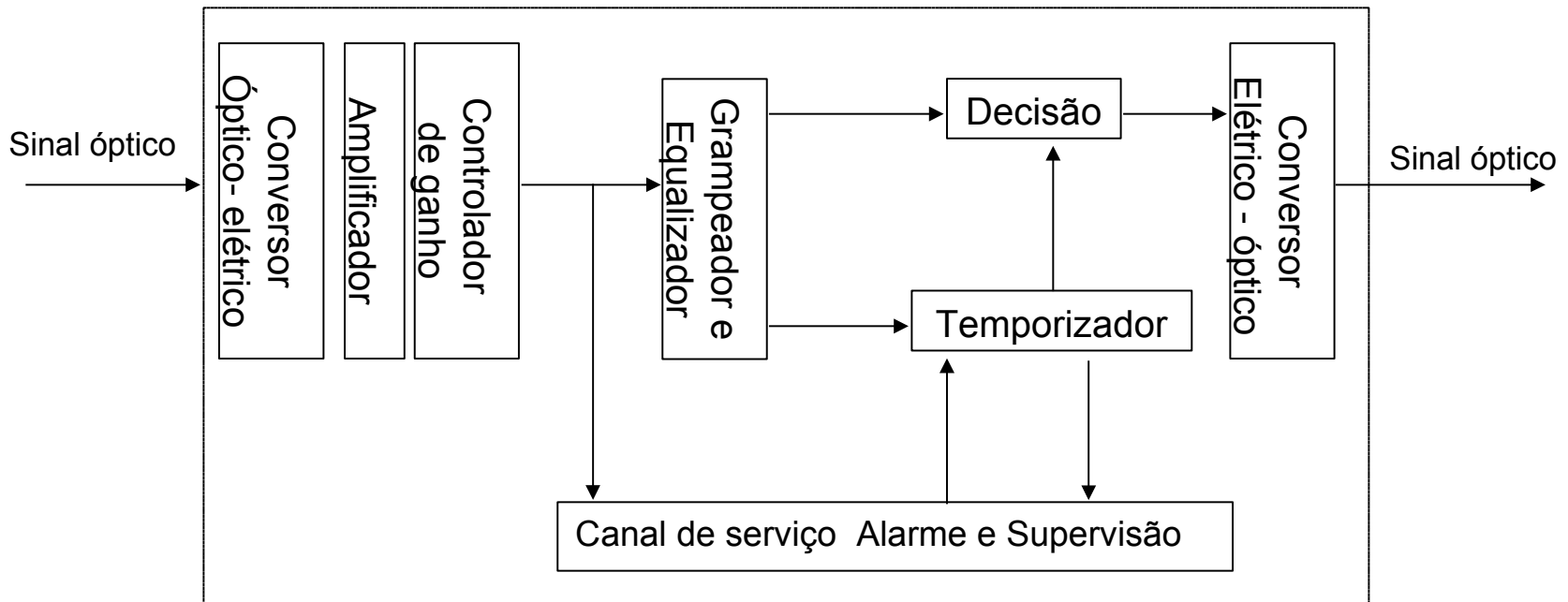
2R – amplificam e reformatam o sinal.

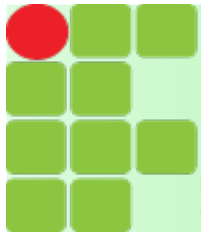
3R – amplificam, reformatam e retemporizam.



Amplificadores ópticos Regeneradores

A construção de regeneradores 3R, e as vezes de regeneradores 2R, nos sistemas ópticos envolve a conversão do sinal óptico em elétrico na entrada do regenerador e sua posterior reconversão eletro-óptica na saída. Isso encarece o uso dos mesmos, além de adicionar dependências e complicações para o enlace.

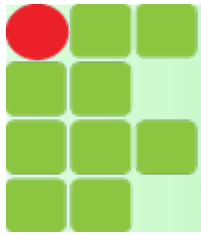




Amplificadores ópticos Regeneradores

As principais desvantagens do uso de regeneradores que necessitam da conversão eletro-óptica em relação aos totalmente ópticos são:

- 1) Sensibilidade a taxa de transmissão – os equipamentos óptico/elétricos são projetados para uma determinada taxa de transmissão. A mudança da taxa implica na troca do equipamento. Por sua vez a taxa de transmissão é transparente para os equipamentos totalmente ópticos.
- 2) Sensibilidade ao λ – os equipamentos óptico/elétricos são projetados para um único λ . Em sistemas WDM são necessários um equipamento para cada canal. Os equipamentos ópticos podem operar em uma BW razoavelmente larga.
- 3) Aumento do tempo de atraso – devido ao tempo necessário para conversão e reconversão do sinal, os equipamentos eletro/ópticos geram atrasos no tempo de propagação do sinal.
- 4) Custos – o custo de fabricação dos equipamentos eletro/ópticos são mais elevados do que os totalmente ópticos.

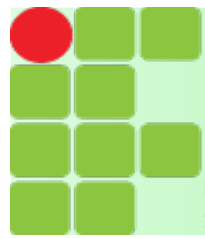


Amplificadores ópticos Regeneradores

Para diminuir os custos de implementação os enlaces ópticos são projetados visando diminuir a necessidade de regeneradores ópticos/elétricos, optando por combinações de **amplificadores** e **compensadores** de dispersão totalmente ópticos.

Há possibilidades de diminuir a dispersão do sinal (reformatar o sinal) utilizando fibras com perfis de dispersão diferenciados. Nessas fibras a relação entre a velocidade da luz e o comprimento de onda apresentam comportamento inverso aquele apresentado nas fibras normais.

Em termos de amplificadores ópticos existem os baseados nas não linearidades produzidas pelos espalhamentos de **Raman (SRS)** e **Brillouin (SBS)**, os baseados nas fibras dopadas com érbio (**EDFA**) e os construídos com semicondutores (**SOA**). Predominam nos sistemas ópticos os **EDFAs**.

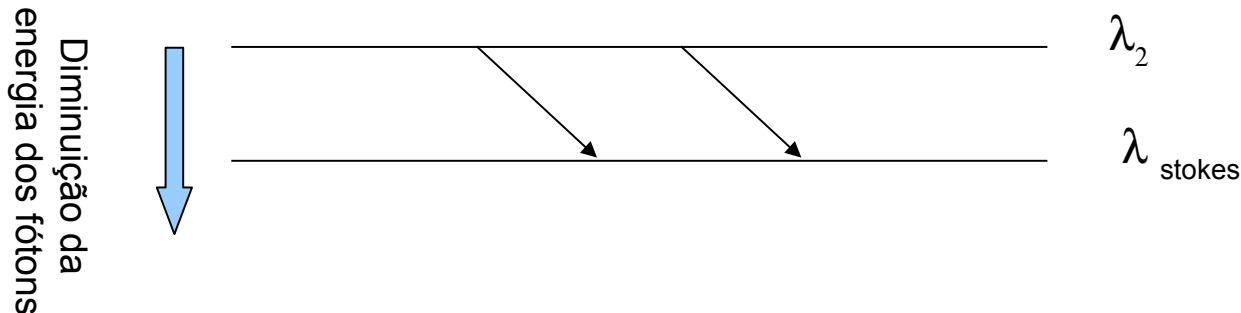


INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

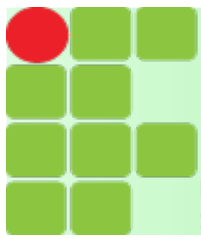
Amplificadores ópticos de espalhamento estimulado (SRS e SBS)

Os amplificadores ópticos baseados nos espalhamentos estimulados de **Raman** e **Brillouin** consistem de uma fibra com comprimento igual ou superior a 1Km que é alimentada (bombeada) por uma fonte laser com comprimento de onda central igual a λ_2 .

Devido a alta densidade de potência luminosa provocada pela fonte laser, os fótons da onda luminosa com λ_2 passam a interagir com as vibrações mecânicas da fibra, fornecendo energia para essas vibrações e, conseqüentemente diminuindo o seu λ . Os fótons com o novo λ compõem a onda luminosa de Stokes.



Geração da onda Stokes devido ao decaimento da energia dos fótons da onda λ_2 . A energia é transferida para a fibra.



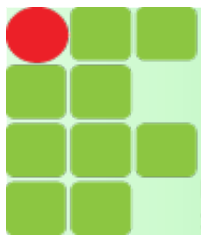
Amplificadores ópticos de espalhamento estimulado (SRS)

O espalhamento utilizado na amplificação do sinal óptico é aquele resultante do aumento da densidade de potência óptica na fibra.

Quando a densidade de potência óptica numa fibra ultrapassa um certo limiar fenômenos não lineares passam a acontecer e os fótons passam a interagir com as vibrações mecânicas da fibra.

A alta densidade luminosa gera oscilações mecânicas na estrutura da fibra. A onda propagante interage com essas oscilações perdendo parte da potência luminosa, os fótons perdem energia.

A perda de energia dos fótons muda o λ dos mesmos, gerando uma nova onda luminosa com λ maior. A onda gerada é denominada de onda Stokes.



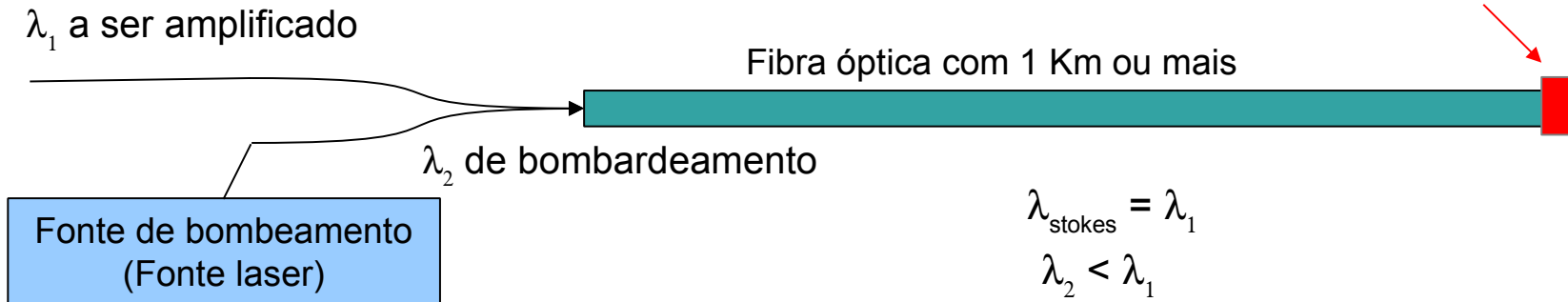
Amplificadores ópticos De espalhamento estimulado

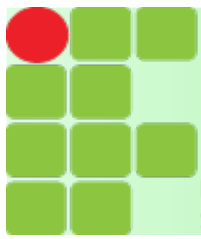
A onda de Stokes gerada nos amplificadores, idealmente, deve apresentar o mesmo λ da onda propagante (onda que se deseja ampliar). Sendo que a diferença de frequência entre a onda λ_2 e a onda λ_{stokes} é de 13 THz.

Como a onda de Stokes é gerada devido ao decaimento da energia dos fótons $\lambda_{\text{stokes}} > \lambda_2$, pois $\lambda = (h.c)/E$ (onde E é a energia do fóton)

Nos amplificadores de espalhamento estimulado o comprimento de onda da fonte de bombeamento (λ_2) é determinado para que a onda de Stokes gerada tenha o λ_{stokes} igual ou próximo ao λ da onda que se deseja amplificar (λ_1)

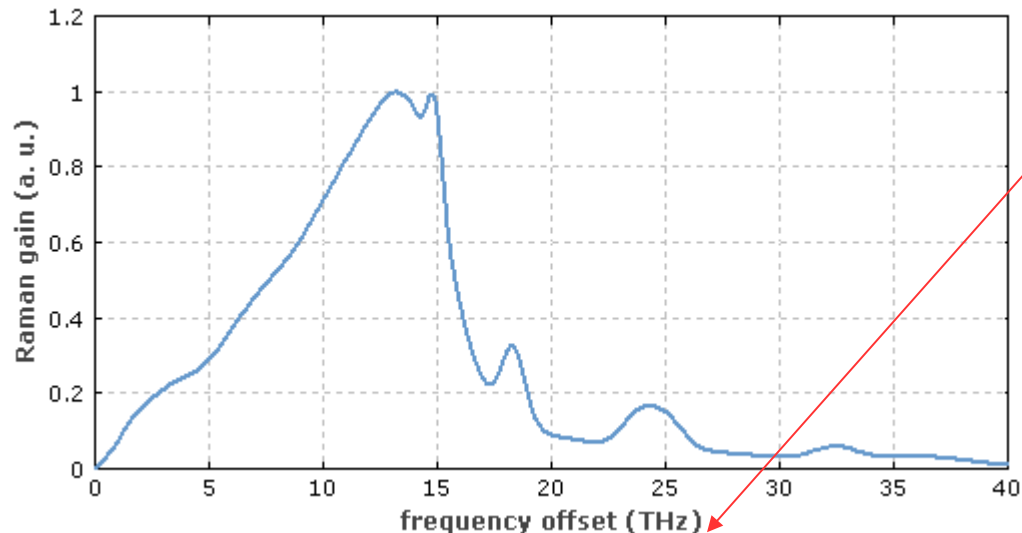
Atenuador para λ_2 evita a reflexão do sinal e a formação de uma cavidade ressonante dentro do amplificador.

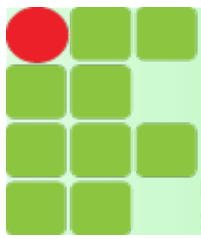




Amplificadores ópticos de espalhamento estimulado

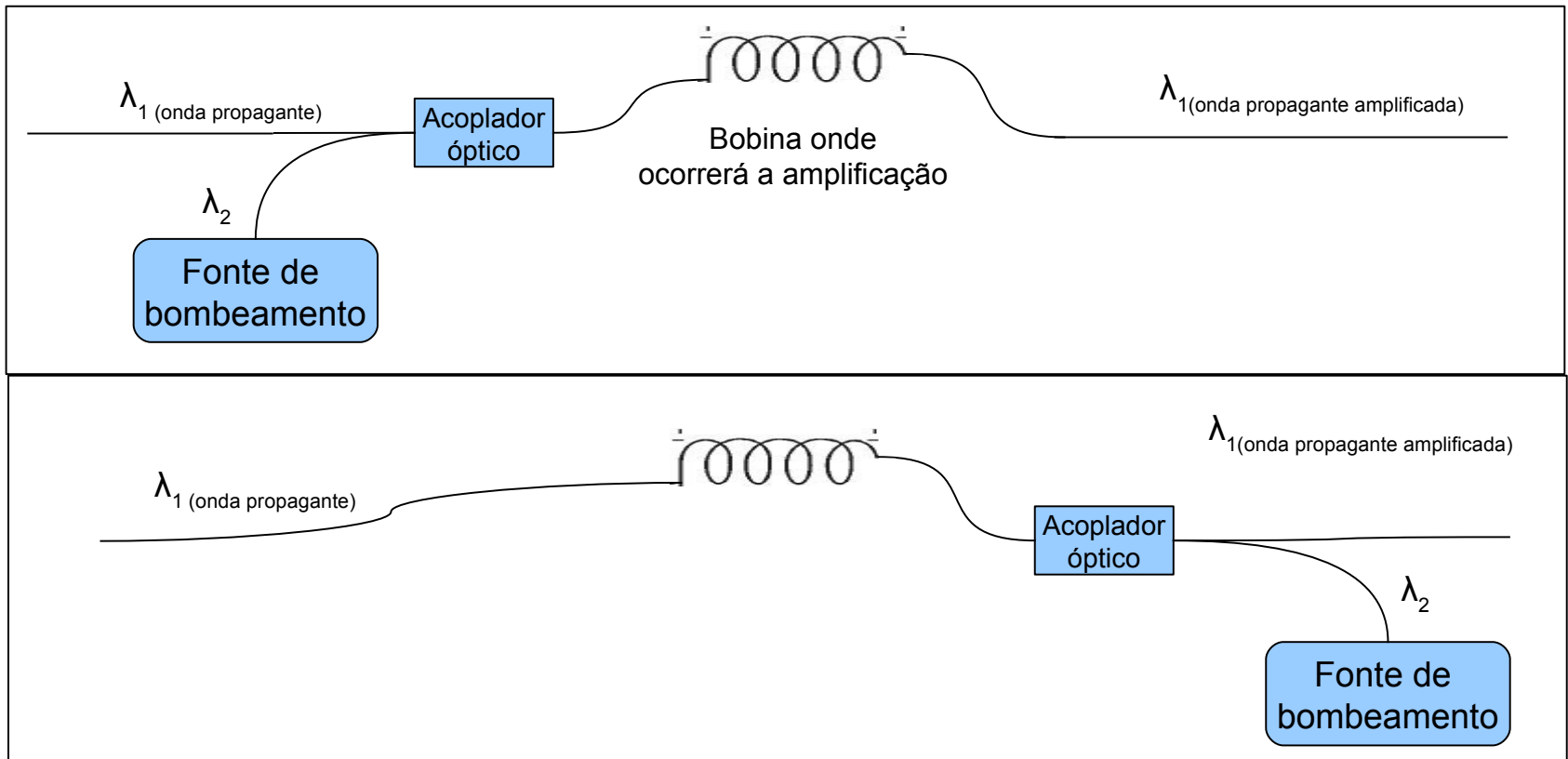
Como comentado, o decaimento da energia da onda de bombeamento λ_2 , gera outra onda com λ_1 tal que $\lambda_2 < \lambda_1$. Este decaimento não ocorre para um único λ_1 . Ele ocorre com um pico no λ_{stokes} , porém com uma largura espectral ampla. Em função disso os amplificadores baseados em espalhamento estimulado (SRS) podem operar em um largo espectro de comprimentos de onda.

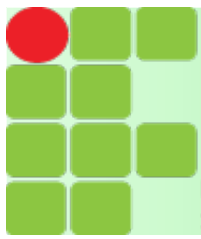




Amplificadores ópticos de espalhamento estimulado

No amplificador estimulado de Raman o bombeamento pode ser realizado nos dois sentidos, no início ou no final da bobina de fibra.

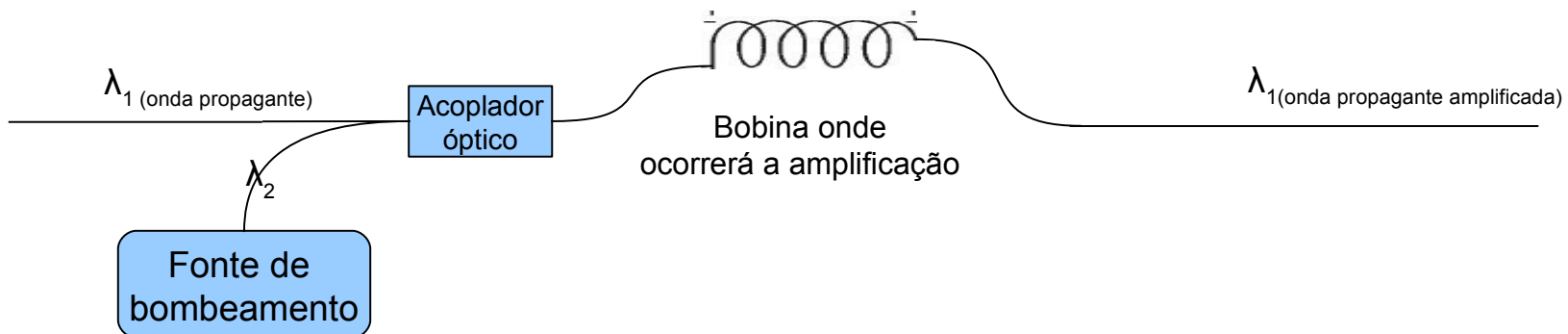


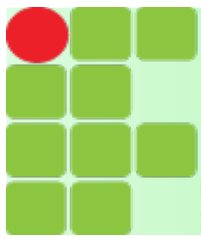


Amplificadores ópticos de espalhamento estimulado

Nos amplificadores de espalhamento estimulado de Raman a potência óptica da fonte deve ficar entre 0,5 e 1,0 W. A densidade de potência na fibra nesses amplificadores é de 10 a 1000 vezes superior a densidade necessária nos amplificadores de Brillouin. O ganho produzido pelos amplificadores Raman também são maiores.

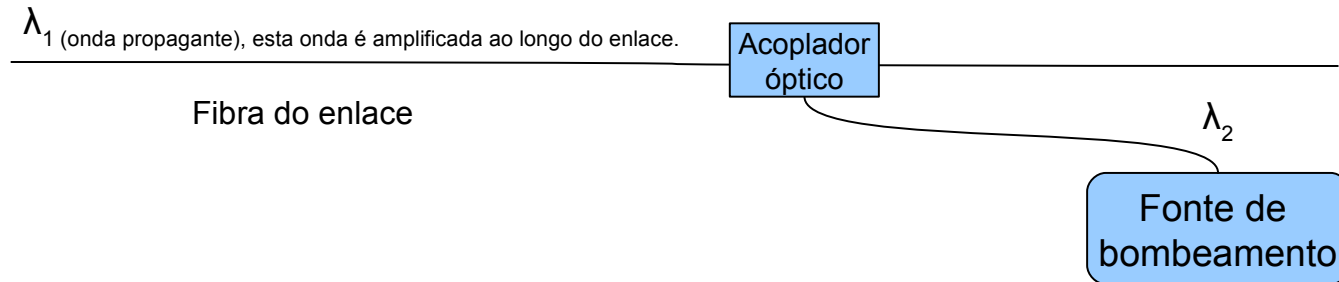
Em termos de bombeamento de luz os amplificadores de Brillouin devem ter o bombeamento no mesmo sentido da onda propagante:

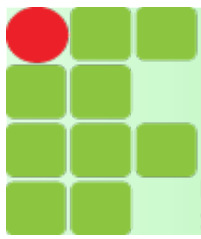




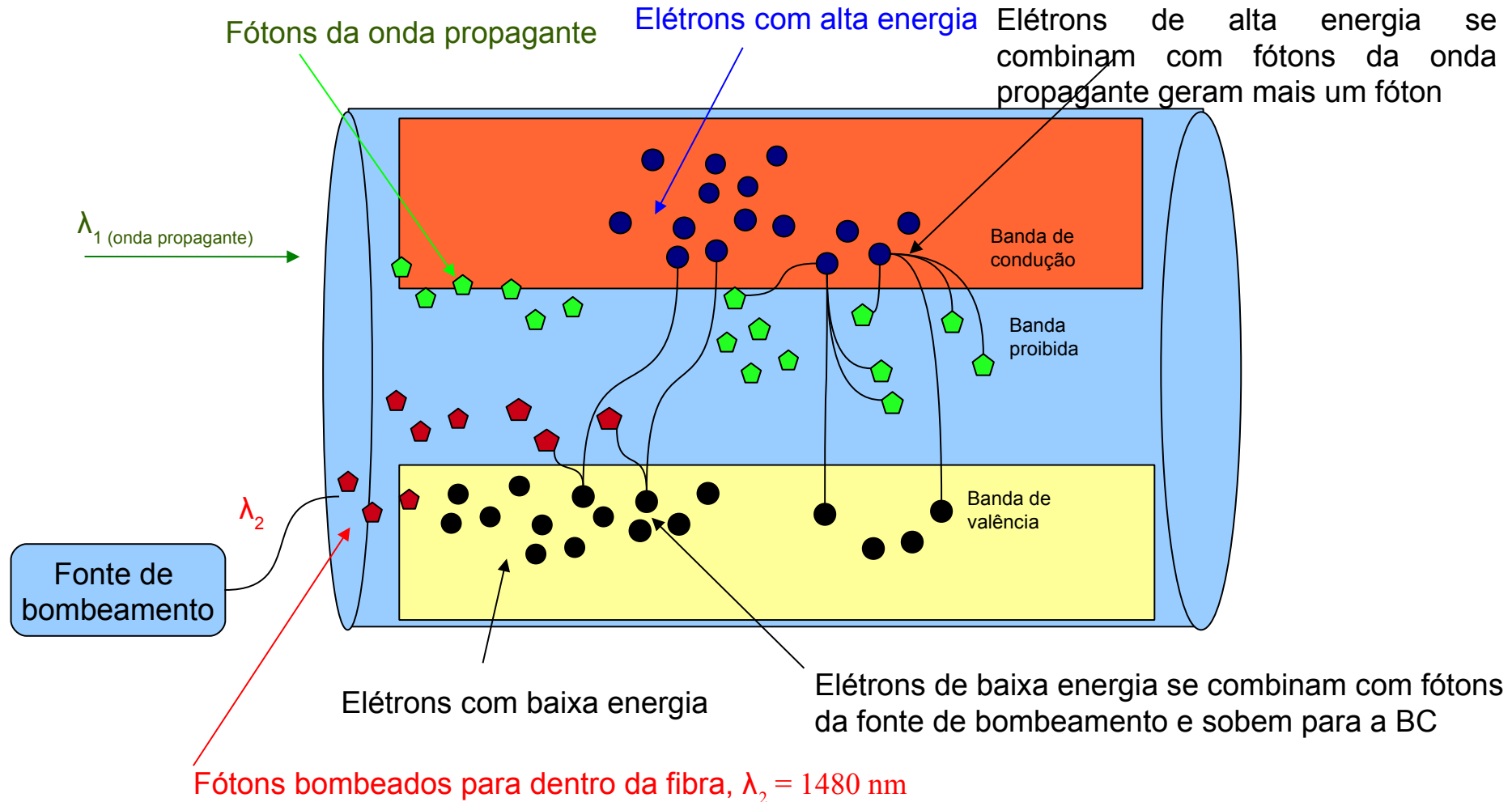
Amplificadores ópticos de espalhamento estimulado

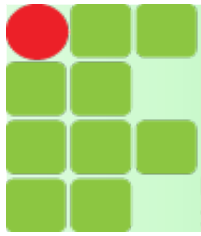
Como a fibra utilizada no amplificar SRA é o mesmo tipo de fibra utilizado para a transmissão da luz, uma das formas de implementação deste amplificador é utilizando a própria fibra de comunicação. Isto é, a fonte de bombeamento é acoplada a fibra de transmissão, aumentando a densidade luminosa nesta fibra e amplificando o sinal. Essa forma de amplificação é denominada distribuída, pois ocorre ao longo da enlace. Para evitar ruídos no sinal devido a oscilação da potência da fonte, nos casos de amplificação distribuída o bombeamento é geralmente contrapropagante.





Amplificadores ópticos de fibra dopada com érbio (EDFA)



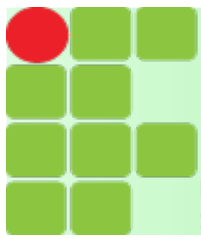


Amplificadores ópticos de fibra dopada com érbio (EDFA)

O bombeamento excita a fibra dopada com érbio, levando os elétrons da fibra para a banda de condução.

A onda propagante combina-se com os elétrons na banda de condução gerando o decaimento dos elétrons para a banda de valência e a geração de um fóton idêntico ao fóton da onda propagante.

O bombardeio da fibra geralmente utiliza fonte laser com λ central de 980 nm.



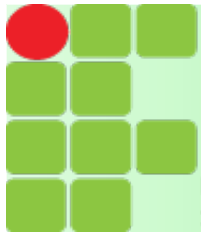
INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

Amplificadores ópticos de fibra dopada com érbio (EDFA)

Nos amplificadores EDFA o princípio de amplificação está baseado na dopagem do núcleo da fibra hospedeira com materiais especiais, classificados quimicamente como terras raras. Esses materiais dopantes têm a propriedade de emitir fótons quando submetidos a uma irradiação óptica externa.

Na janela de 1550 nm o material utilizado é o **érbio (E_r^{3+})** e na janela de 1310 nm utiliza-se o **neodímio e o praseodímio**.

Como o uso de amplificadores é mais comum na janela de 1550 nm, sistemas de longas distâncias, o uso de amplificadores dopados com érbio é mais comum.

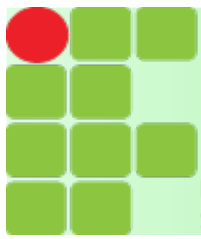


Amplificadores ópticos de fibra dopada com érbio (EDFA)

Ruído em amplificadores EDFA

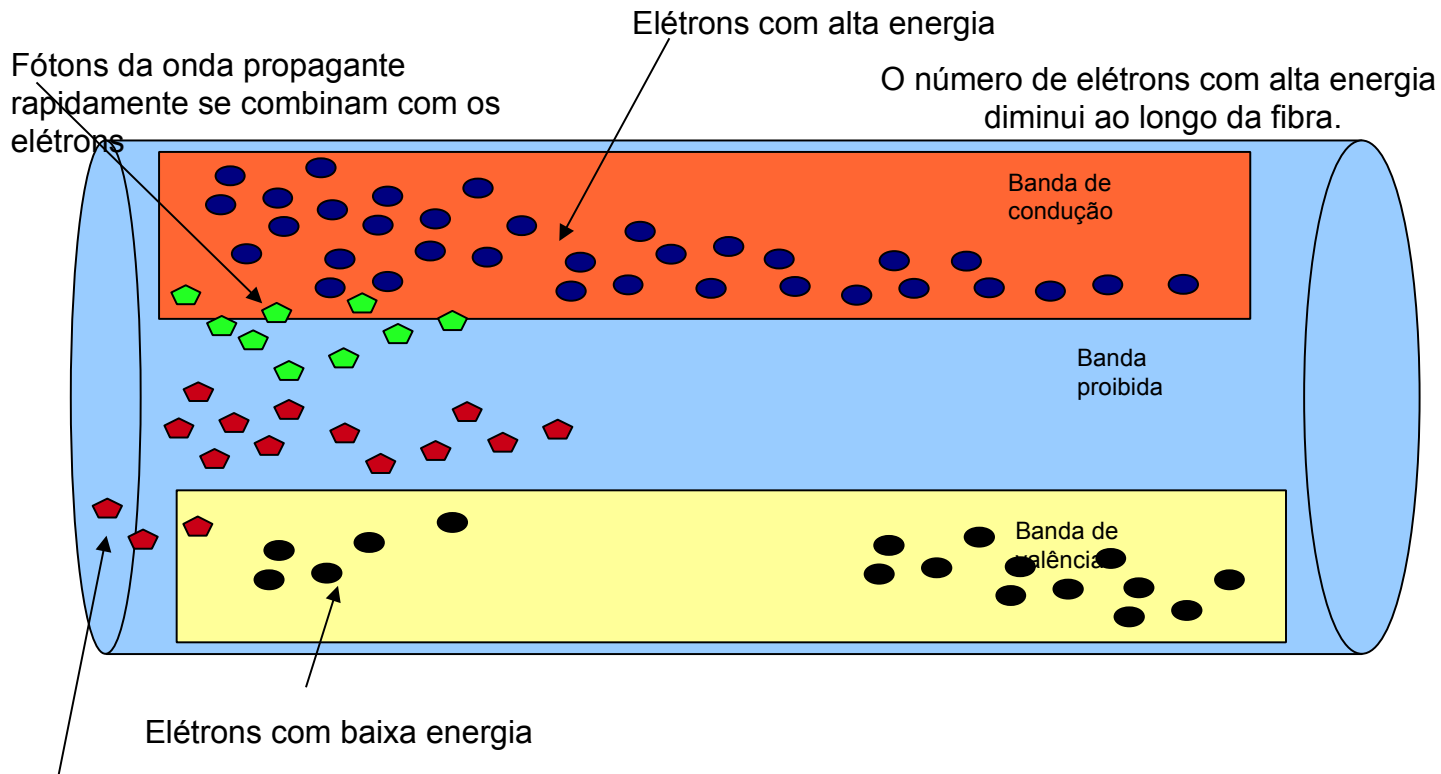
O ruído nos amplificadores ópticos ocorrem principalmente devido as recombinações espontâneas, decaimento de elétrons com liberação de luz independente da luz da onda propagante (geralmente com $\lambda = 1553$ nm)

Como a amplificação da luz ocorre ao longo de toda a fibra dopada e a população de elétrons na banda de condução pode variar, é possível diminuir o ruído devido a recombinação espontânea controlando o número de elétrons na camada de condução.

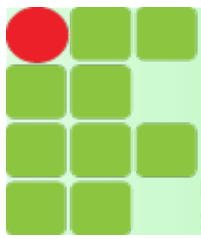


Amplificadores ópticos de fibra dopada com érbio (EDFA)

Para sinais de entrada altos a concentração de elétrons no início da fibra permite a recombinação rápida entre elétrons - fótons, diminuindo a probabilidade de emissão espontânea. Isso é possível fazendo o bombeamento no início da fibra.



Fótons bombeados no início da fibra excitam os elétrons para a banda de condução.



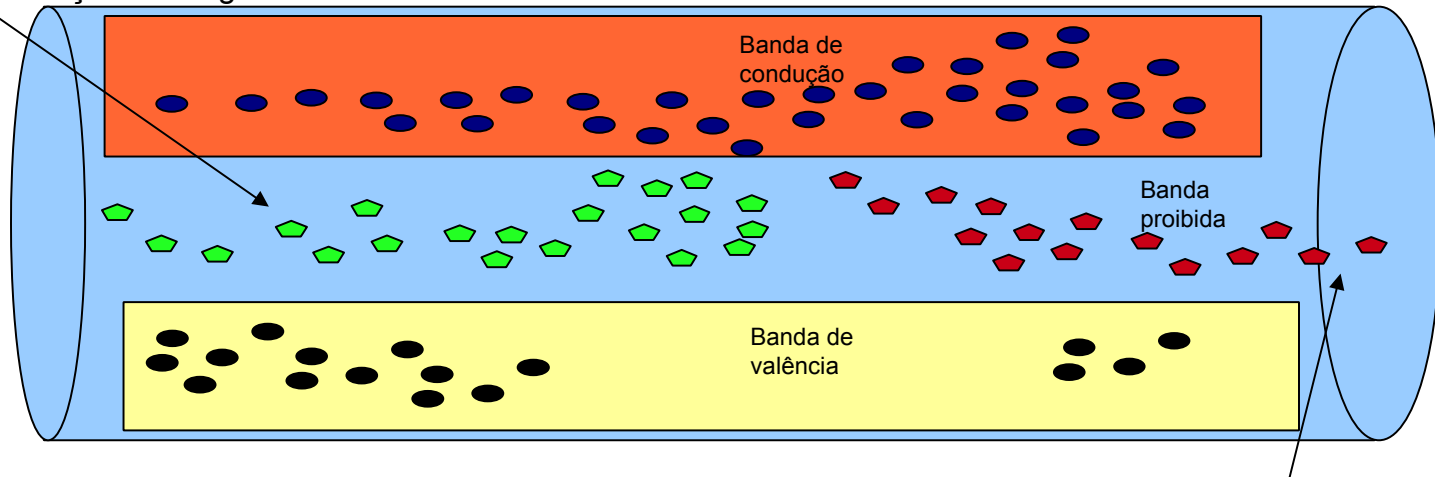
Amplificadores ópticos de fibra dopada com érbio (EDFA)

Para sinais de entrada baixos o bombeamento pelo final da fibra gera uma maior população de elétrons excitados no final da fibra. No início da fibra os elétrons livres são em menor número, tornando menor a probabilidade de um elétron não combinar com um fóton (o número de fótons da onda propagante é próximo do número de elétrons livres).

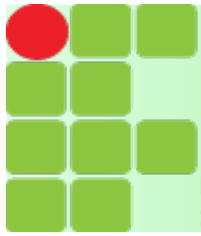
Após passar pela zona com menos elétrons a onda propagante terá sofrido uma primeira amplificação, permitindo um melhor aproveitamento da grande população de elétrons no final da fibra.

A onda propagante realiza uma pré amplificação ao longo da fibra

O número de elétrons com alta energia aumenta ao longo da fibra.

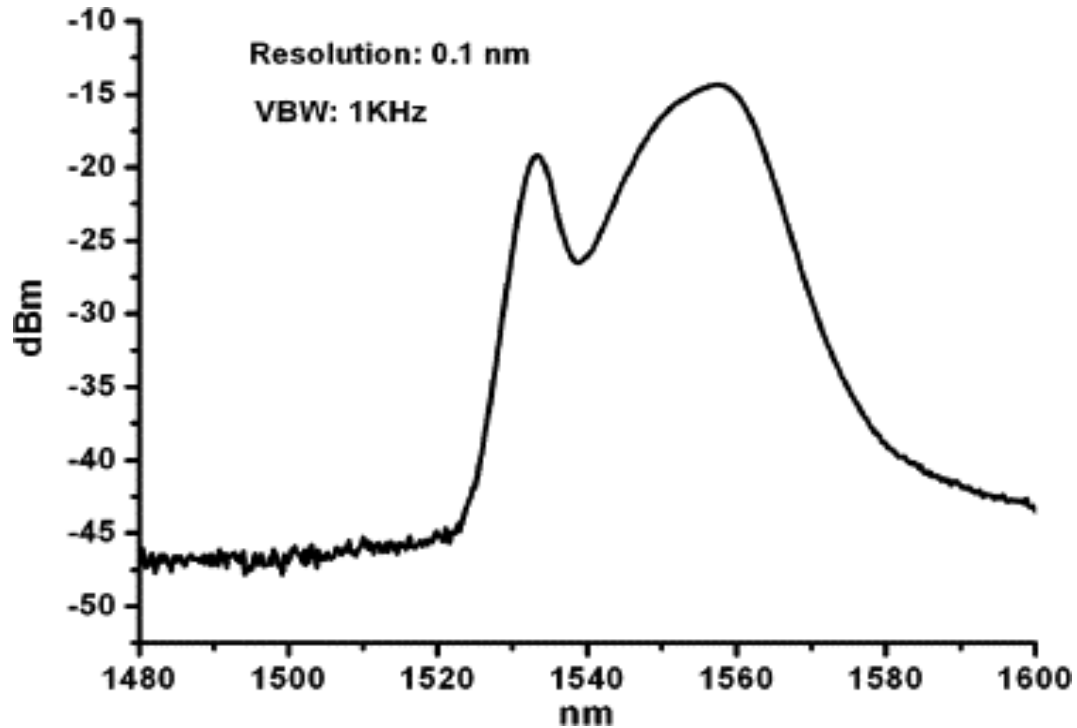


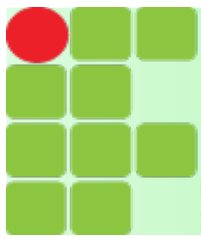
Fótons bombeados no final da fibra excitam os elétrons para a banda de condução.



Amplificadores ópticos de fibra dopada com érbio (EDFA)

Largura espectral do amplificador EDFA



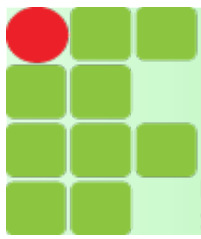


Amplificadores ópticos de fibra dopada com érbio (EDFA)

A largura espectral do EDFA não é plana e apresenta variações de alguns dB no ganho fornecido em função do λ da onda a ser amplificada.

Conforme pode ser observado no gráfico da transparência anterior a largura espectral do EDFA fica entre 24 e 30 nm. Essa largura não permite a cobertura de todas as bandas utilizadas em sistemas de transmissão WDM, sendo necessário o emprego de EDFAs com diferentes larguras espectrais.

Para alterar a largura espectral dos EDFAs são utilizados co-dopantes, tais como germânio, alumínio e fósforo. Estes co-dopantes permitem ampliar a largura espectral para 50 nm.



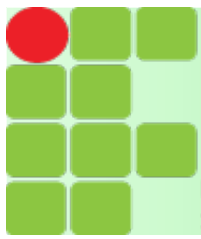
Amplificadores ópticos de fibra dopada com érbio (EDFA)

Saturação do ganho dos EDFAs

A saturação dos EDFAs ocorre quando o nível de portadores excitados diminui quando comparado com o número de fótons do sinal de entrada.

Com a diminuição do número de portadores ocorrerá a diminuição da amplificação total do sinal.

Diferente dos amplificadores eletrônicos, nos quais o ponto de saturação representa uma quebra bruta na curva do ganho, nos amplificadores ópticos a “entrada” no processo de saturação é suave, não ocorrendo distorção no sinal.

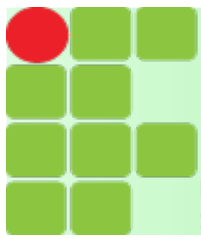


Amplificadores ópticos de fibra dopada com érbio (EDFA)

Nos amplificadores eletrônicos, qualquer sinal acima de uma determinada tensão é cortado pela saturação.

Nos amplificadores ópticos os sinais não são “cortados”, apenas o ganho do amplificador, para qualquer λ de entrada, diminui. O sinal continua a ser amplificado, porém com um ganho menor.

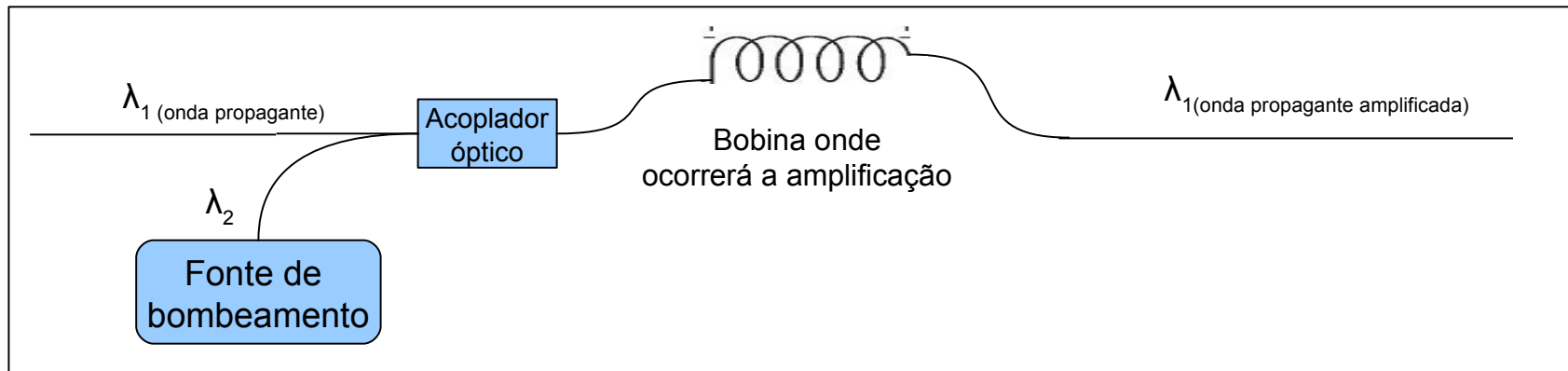
Quando operando na região de saturação o EDFA diminui a geração de ruídos, pois será mais difícil o decaimento espontâneo dos elétrons da camada de condução.

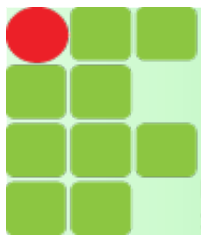


EDFAs - tipos de bombeamentos e suas aplicações

Existem três configurações diferentes para o bombeamento dos EDFAs:

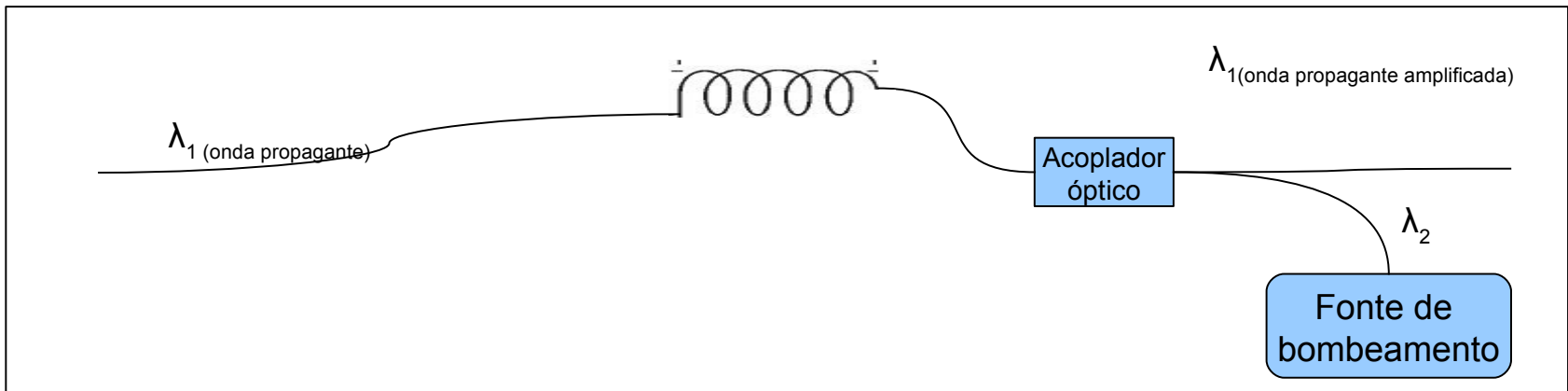
Co-propagante – o bombeamento é realizado no início da bobina de amplificação, garantindo o mesmo sentido para a onda propagante e a onda bombeada.

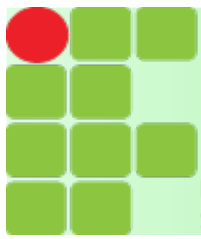




EDFAs - tipos de bombeamentos e suas aplicações

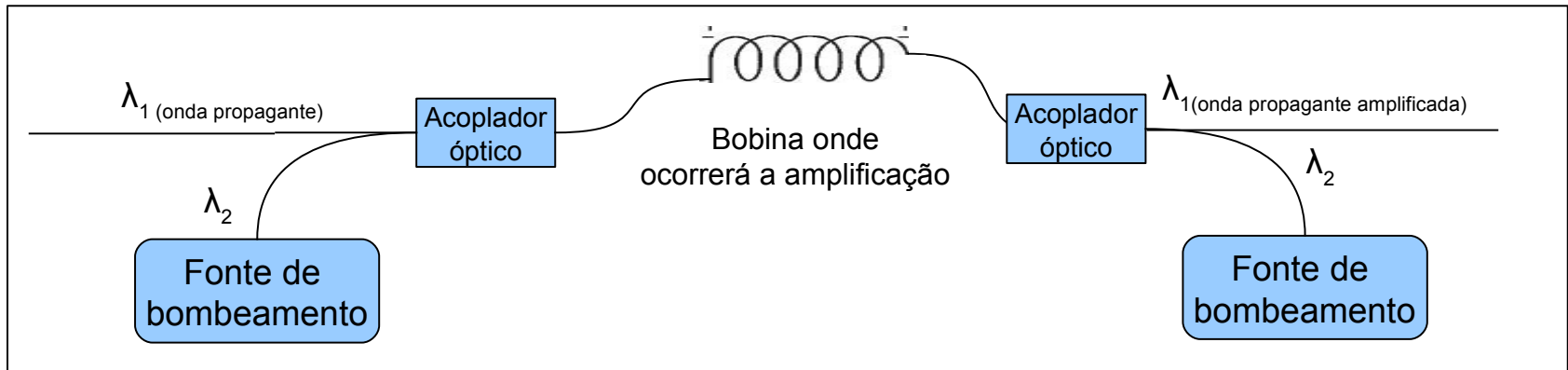
Contra-propagante – o bombeamento é realizado no final da bobina de amplificação, o que torna o sentido da onda bombeada contrário ao da onda propagante.

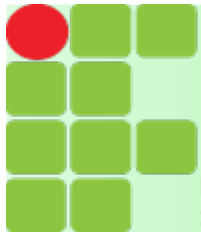




EDFAs - tipos de bombeamentos e suas aplicações

Simultâneo – o bombeamento é realizado por duas fontes, uma no início da bobina e outra no final. Esse tipo de bombeamento garante uma concentração mais uniforme de elétrons na camada de condução ao longo da bobina.

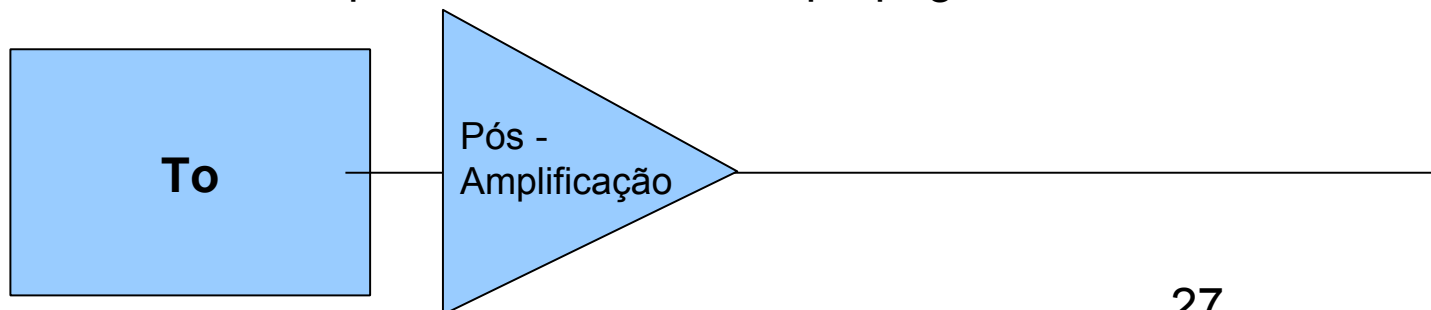


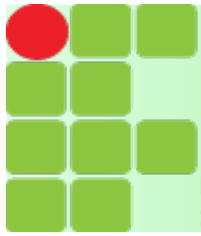


EDFAs - tipos de bombeamentos e suas aplicações

Num enlace óptico de longa distância os amplificadores serão encontrados em três posições diferentes. Conforme a sua posição um tipo de bombeamento é mais adequado:

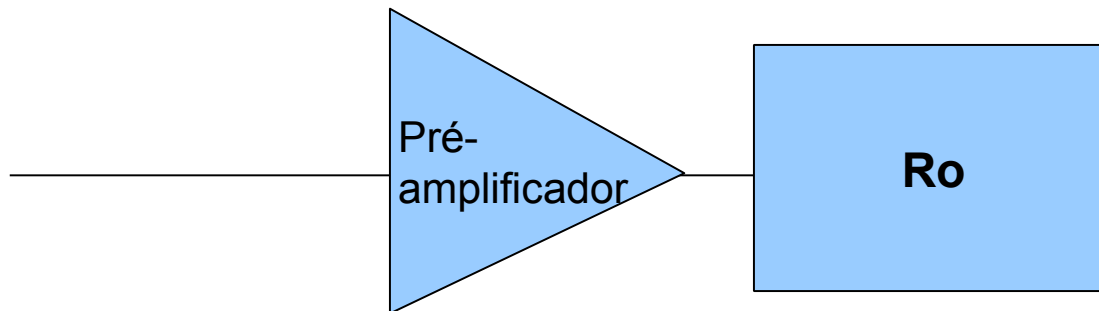
Pós-amplificadores – são os amplificadores localizados na saída do equipamento transmissor, muitas vezes são o último módulo desses equipamentos. Como o sinal que irá entrar no amplificador é alto, é aconselhável o uso do bombeamento co-propagante. Esse tipo de bombeamento garante uma grande número de elétrons na camada de condução no início da bobina de amplificação. Esses elétrons facilmente serão estimulados pelos fótons da onda propagante.

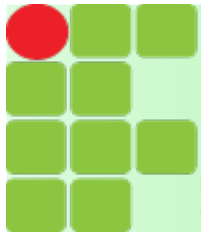




EDFAs - tipos de bombeamentos e suas aplicações

Pre-amplificadores – são os amplificadores localizados na entrada do equipamento receptor, muitas vezes são o primeiro módulo desses equipamentos. Como o sinal que irá entrar no amplificador é baixo, pois foi atenuado ao longo do enlace, é aconselhável o uso do bombeamento contra-propagante. Esse tipo de bombeamento garante um grande número de elétrons na camada de condução no final da bobina de amplificação. Assim a luz que será amplificada pode sofrer uma pré-amplificação ao longo da bobina e no final da mesma já dispor de mais fótons para estimular um número mais elevado de elétrons da camada de condução.





EDFAs - tipos de bombeamentos e suas aplicações

Amplificadores de Linha – são os amplificadores localizados ao longo da linha. Esses amplificadores só são utilizados em enlaces de longa distância onde a pós e pré amplificação não são suficientes para amplificar o sinal. Nesse amplificadores o tipo de bombeamento pode variar, sendo possível inclusive a adoção de estágios de amplificação. Num primeiro estágio o EDFA poderia ter bombeamento contra-propagante, garantindo uma pré-amplificação da onda sem geração do ruído. No segundo estágio, a onda é re-amplificada através do uso de um EDFA com bombeamento co-propagante.

