

### 3

## Técnicas de conversão de comprimento de onda utilizando amplificador óptico semiconductor

Neste capítulo, serão analisados os métodos de conversão de comprimento de onda, e como os sinais originais e convertidos são afetados pelos diversos conversores e técnicas disponíveis, dando ênfase à utilização de amplificadores ópticos semicondutores. As seções a seguir descrevem as técnicas mais comuns e como estas atingem a conversão óptica de frequências.

As técnicas de conversão de comprimento de onda são agrupadas em dois grupos principais:

**Métodos optoeletrônicos** São métodos que implicam conversão do sinal original para o domínio elétrico.

**Métodos totalmente ópticos** Quando a manipulação do sinal é feita no domínio óptico. É subdividida em mais duas categorias: conversores por chaveamento óptico e conversores por mistura de ondas.

### 3.1

#### Conversão opto-eletr-óptica

O primeiro método criado para conversão de comprimento de onda é, simplesmente, detectar um sinal, e remodulá-lo em um novo  $\lambda$ . Um modelo simplificado pode ser encontrado na Figura 3.1.

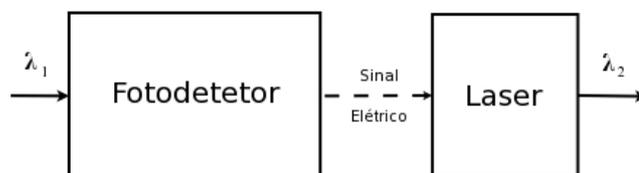


Figura 3.1: Método opto-eletr-óptico de conversão de comprimento de onda.

O método é simples: um receptor óptico faz a conversão opto-elétrica do sinal no comprimento de onda original,  $\lambda_1$ , e envia o sinal elétrico para modular um transmissor óptico emite no comprimento de onda de saída,  $\lambda_2$ .

É relativamente fácil a implementação deste método, já que utiliza componentes comuns a sistemas ópticos convencionais [2]. Uma vantagem deste método é a insensibilidade à polarização da onda, por causa da detecção; há também a possibilidade de re-amplificação do sinal, caso um regenerador seja utilizado para este fim [2–5]. Entretanto, os custos deste conversor podem ser caros, dado a quantidade de componentes necessários [2, 3].

Porém, este método não é independente do formato de modulação e da taxa de transmissão [2], pois o receptor e o transmissor são fixos. A velocidade de conversão<sup>1</sup> é limitada pela eletrônica. Potencialmente, este método pode fazer a chamada conversão *multicast*, onde um único sinal de entrada é convertido para vários canais simultaneamente, se o transmissor de saída for um *array* de diodos Laser. Contudo, este conversor só opera a partir de um único sinal de entrada. As características deste tipo de conversor encontram-se resumidas no Quadro 3.1.

**Quadro 3.1** Características de conversores de comprimento de onda pelo método opto-eletrônico.

Vantagens	Desvantagens
Fácil implementação	Alto custo
Utiliza componentes comuns	Velocidade é limitada pela eletrônica
Insensibilidade à polarização	É fixo quanto à taxa de transmissão
Possível regeneração do sinal	É fixo quanto ao formato de modulação
Pode fazer conversão <i>multicast</i>	Apenas um sinal pode ser convertido

### 3.2 Métodos totalmente ópticos

As desvantagens do método optoeletrônico, aliadas ao desenvolvimento de *chips* fotônicos, fomentaram o desenvolvimento de técnicas totalmente ópticas para a conversão de frequências [2]. As mais utilizadas serão descritas a seguir. Estas são baseadas em efeitos não-lineares, que dão nomes às técnicas. Os efeitos são conseguidos por meio de amplificadores saturados ou pelo uso de fibras com alto grau de não-linearidades [41].

Os métodos totalmente ópticos se dividem em *chaveamento óptico* e *mistura de ondas*. Os do primeiro grupo utilizam dispositivos operando como “chaves” para permitir a passagem ou não de um sinal, transferindo assim a modulação para este, como nos métodos de modulação de ganho cruzado, modulação de fase cruzada ou modulação de absorção cruzada. Os por mistura

<sup>1</sup>Velocidade aqui está relacionada à taxa máxima de conversão.

de onda, criam uma nova frequência que conterá a informação do sinal a ser convertido; exemplos destes métodos são a mistura de quatro ondas e a geração de frequência de diferença - DFG.

A conversão de comprimentos de onda baseada em dispositivos à fibra tem a vantagem de ser compatível com taxas muito altas [2,4]; entretanto, estes dispositivos não são integráveis [4]. Para este fim, prestam-se especialmente os *amplificadores ópticos semicondutores*, SOAs, porque estes são capazes de serem integrados com outros componentes opto-eletrônicos [4] e necessitam de menores potências de bombeio, para que esses fenômenos ocorram [6]. Outra vantagem do uso de SOAs é a facilidade de fabricação, já que são construídos de forma semelhante a diodos Laser [4]. Estas razões levaram os SOAs a serem a base da tecnologia de construção de conversores de comprimento de onda [4,6], em detrimento das fibras.

Nas próximas seções serão mostrados os métodos mais utilizados com amplificadores ópticos semicondutores, e suas implicações no sinal convertido.

## Figuras de mérito

Definir-se-ão aqui algumas figuras de mérito para a comparação entre as técnicas. Um parâmetro importante de comparação dos sinais convertidos é a *razão de extinção* [1–3,8]; ela relaciona as potências de máximo e mínimo de um sinal:

$$ER = \frac{P_{max}}{P_{min}}, \quad (3-1)$$

onde  $P_{max}$  e  $P_{min}$  são as potências de máximo e mínimo do sinal, respectivamente. A eficiência de conversão [11] é outro parâmetro que pode ser utilizado para a comparação entre técnicas; esta é a razão entre a potência do sinal convertido e a do original. A eficiência de conversão é definida por:

$$\eta_{conv} = \frac{P(\lambda_{conv.})}{P(\lambda_{orig.})}, \quad (3-2)$$

onde  $P(\lambda_{conv.})$  e  $P(\lambda_{orig.})$  são as potências de sinal convertido e original, respectivamente.

### 3.2.1

#### Modulação de ganho cruzado

Um primeiro método totalmente óptico de conversão de comprimento de onda denomina-se “modulação de ganho cruzado” (em inglês, *Cross-Gain Modulation*, ou XGM) [1–3].

Esta técnica baseia-se no efeito de saturação de ganho, descrito no item 2.2.1. Um sinal óptico, dito *pump*, é inserido em um dispositivo não linear,

de tal maneira que sua intensidade o sature. Daí, o ganho do dispositivo cai. Caso seja aplicado simultaneamente um outro sinal mais fraco, dito *probe*, de amplitude constante (CW - *Continuous Wave*) e em outro  $\lambda$ , este verá um ganho menor, portanto terá sua potência reduzida. Quando o *pump* saturar o amplificador, o *probe* terá sua amplitude diminuída, devido à saturação do ganho; e, quando o *pump* tiver intensidade tal que não sature mais o amplificador, o *probe* voltará a seu patamar original. i.e., se o sinal *pump* possuir variações em amplitude, o sinal *probe* as perceberá de forma inversa. Por isto, este conversor de comprimentos de onda *inverte* a lógica do sinal.

Esta técnica somente se aplica a sistemas com modulação em amplitude, já que a informação que é transferida de um sinal ao outro está somente na amplitude do sinal original.

Caso a saturação de ganho seja percebida por um espectro largo, como em SOAs [8], pode-se utilizar este efeito para a conversão de um para múltiplos canais [6, 11], a chamada conversão *multicast*, que se opõe à conversão *unicast*, que é de um para um. A conversão *multicast* é obtida ao se colocar múltiplos sinais *probe*, em modo contínuo [38], na entrada do amplificador.

Há duas configurações possíveis para este tipo de conversor: co- ou contra-propagante. Na co-propagante, um filtro passa-faixa, na saída do dispositivo, retira apenas o comprimento de onda convertido; já na contra-propagante, não se faz necessário o uso do filtro, pois os sinais estão separados mecanicamente. Ilustrações destas configurações, podem ser vistas nas Figuras 3.2(a) e (b).

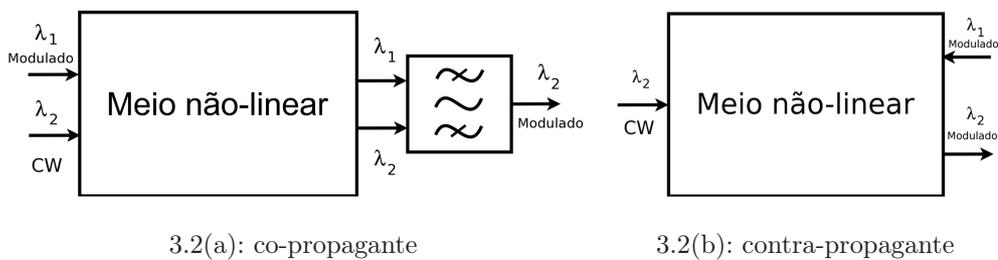


Figura 3.2: Método de modulação de ganho cruzado para conversão de comprimento de onda.

Apesar da configuração contra-propagante não utilizar um filtro passa-faixa, esta possui uma frequência de corte mais baixa que a co-propagante, pois o *pump* e o *probe* não viajam conjuntamente pelo amplificador [4]. Para a configuração co-propagante, o ruído é menor que no caso contra-propagante [42], pela diminuição da ASE devido à depleção do ganho.

A limitação de frequência para este conversor é dada pelo tempo de recuperação do ganho [30,34]. Este tempo pode ser reduzido de várias maneiras, seja aumentando a corrente de polarização do amplificador, o comprimento da

cavidade [36] ou por aumentar a potência de entrada no SOA. Este último pode ser conseguido ou por um sinal *probe* alto [4, 5, 8, 29, 32, 43] ou por mais um sinal em regime contínuo no amplificador [44–46].

Um outro limitante para este método é a modulação em frequência imposta no sinal convertido, o *chirp* [2]. O *chirp* tem origem na dependência do ganho interno com a potência do sinal [47], i.e., quando há um aumento na concentração de portadores na região ativa, alterando o ganho, o índice de refração também sofre uma mudança [2]. Comparando-se o *chirp* imposto por um SOA com aquele produzido por um Laser semiconductor, modulado diretamente, o *chirp* impresso pelo SOA no sinal convertido é de sinal inverso ao imposto por um diodo Laser, o que pode ser utilizado para compensação da dispersão [2, 47].

Outras características desta técnica são, por exemplo, a degradação da razão de extinção para canais que tenham comprimento de onda maior que o *pump* [4–6, 8, 48]. Isto é causado pelo ganho diferencial, menor nesta região [8].

Este tipo de conversor é simples no conceito; entretanto tem suas limitações, tais como: inverte a polaridade do sinal, pois a modulação imposta é inversa; piora a relação sinal-ruído, devido à ASE. Um resumo das características para este conversor se encontra no Quadro 3.2.

**Quadro 3.2** Características de conversores de comprimento de onda do tipo modulação de ganho cruzado.

Vantagens	Desvantagens
Simple conceito e projeto	Só se aplica a modulação em amplitude
Pode fazer conversão <i>multicast</i>	Inverte a polaridade do sinal
É independente de taxa	Piora a razão de extinção
Pode ser sintonizável	Piora a relação sinal-ruído
Independente de polarização	Alto <i>chirp</i> imposto
É integrável	Apenas um sinal pode ser convertido

### 3.2.1.1

#### Modulação de ganho cruzado do espectro da ASE

Um efeito que aparece da saturação causada por um sinal modulante forte em um SOA é a chamada *modulação* do espectro da ASE [9–11, 49–54]. Assim como um sinal que é aplicado na entrada do SOA, a ASE também sofre as alterações em sua amplitude devido à saturação de ganho, já que é um sinal *amplificado*.

Como a ASE é um sinal sempre presente em um SOA, e esta possui um espectro bastante largo [1–3, 12], foi proposto por Deming *et. al.* em 2000 [9, 10],

um método de conversão que utiliza uma técnica chamada de *spectrum-slicing* [55–57] para selecionar o comprimento de onda convertido. Quando o ganho satura, a ASE como um todo percebe as variações em amplitude do sinal que satura o amplificador, perfazendo um espectro de luz incoerente modulada em amplitude [9]. Junto ao fato de não ser necessária a utilização de uma fonte de luz *extra*, para qual o comprimento de onda original será convertido, à modulação de ganho cruzado em SOAs ter um espectro largo, torna este tipo de conversor de comprimentos de onda bastante flexível e mais barato que a técnica clássica, a *pump & probe* [9–11, 49].

Um sinal convertido pela técnica de ASE-XGM apresenta algumas características em comum como os sinais originados de fontes *spectrum-sliced* [55–57], como ser pouco suscetível ao efeito de espalhamento de Brillouin, pois o ganho deste efeito é bastante reduzido para fontes de luz com largura espectral maior que a do efeito [41]. Os sinais *spectrum-sliced* também apresentam resistência aos efeitos danosos do *crosstalk* [57, 58]. Entretanto, os sinais *spectrum-sliced* oriundos de emissão espontânea apresentam um alto ruído de batimento na detecção [59, 60]. O diagrama para este método está mostrado na Figura 3.3.

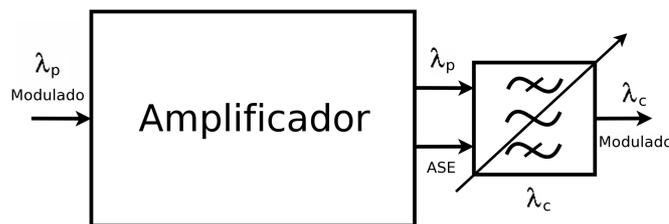


Figura 3.3: Método de modulação de ganho cruzado do espectro da ASE para conversão de comprimento de onda.

O sinal convertido por esta técnica é selecionado pelo uso de um filtro passa-faixa após o SOA [9–11, 49]. Como o canal convertido não é fixo, este conversor é sintonizável por construção, já que toda a ASE recebe a modulação imposta. Por esta mesma razão, este pode ser utilizado para fazer a conversão *multicast*, como demonstrado em [11]. Assim como na técnica *pump & probe*, somente há a conversão de um único canal de entrada.

Além da aplicação da conversão de comprimento de onda para a transmissão, esta técnica também vem sendo utilizada para a construção de pré-amplificadores baseados na modulação da ASE, com resultados até a taxa de 10 Gbit/s [51–53]. Outra aplicação é a conversão de sinais coerentes em incoerentes [54] e vice-versa [59–61].

A limitação dada pelo tempo de recuperação do ganho também ocorre para esta modalidade; as soluções para reduzir o tempo de recuperação de ganho do amplificador são as mesmas que na técnica anterior, excetuando-se aquelas que implicam alguma outra fonte de luz. Comprova-se experimentalmente a conversão utilizando este método para taxas de até 10 *Gbit/s* [11,49].

Como esta técnica é derivada da modulação de ganho cruzado, algumas características são comuns aos dois métodos, tais como a deterioração da razão de extinção para sinais com comprimentos de onda maiores que o *pump*, já que a modulação da ASE para estes comprimentos de onda é menor, o que leva a uma amplitude de sinal convertido menor; também somente pode ser utilizado para modulação em amplitude e inverte a polaridade (ou lógica) do sinal. Para este caso, a relação sinal-ruído óptica não se aplica, já que o sinal convertido é ruído óptico. O Quadro 3.3 contém um resumo das características deste método.

**Quadro 3.3** Características de conversores de comprimento de onda do tipo modulação de ganho cruzado do espectro da ASE em SOAs.

Vantagens	Desvantagens
Simple projeto	Só se aplica a modulação em amplitude
Pode fazer conversão <i>multicast</i>	Inverte a polaridade do sinal
É independente de taxa	Piora a razão de extinção
É sintonizável, se o filtro for	Apenas um sinal pode ser convertido
Independente de polarização	
É integrável	

### 3.2.2

#### Modulação de fase cruzada

A não-linearidade do índice de refração de um meio pode acoplar dois campos eletromagnéticos sem causar transferência de energia entre eles [41]. Este efeito é denominado modulação de fase cruzada - *Cross-Phase Modulation*, XPM. A XPM ocorre devido à dependência do índice de refração do meio com as amplitudes do próprio campo – este efeito é conhecido por auto modulação de fase - SPM, *Self-Phase Modulation*, e sempre acompanha o XPM – e de outros campos propagando no mesmo meio [41]. O fenômeno físico por trás deste efeito é o Efeito Kerr [2,3,41]. O Efeito Kerr é justamente a modulação da fase impressa em um sinal, através dele próprio (SPM) ou de outros (XPM).

Esta abordagem para a conversão de comprimento de onda lança mão do uso de estruturas interferométricas [1–4,41]. Interferômetros são estruturas físicas que utilizam somas dos sinais dentro de seus ramos (ou “braços”) como

chave, realizando interferências construtivas ou destrutivas. Alguns exemplos de interferômetros utilizados são os de Mach-Zehnder, Michelson e de Sagnac [1, 4, 5, 8, 48, 61]. Para este fim, pode-se utilizar amplificadores ópticos semicondutores com bastante eficácia, já que estes são integráveis [8]. Em SOAs, este efeito necessita de potências menores do que no caso de XGM para conseguir uma modulação na fase de  $\pi$  radianos [6, 8, 42, 62].

No caso de conversores de comprimento de onda, os interferômetros são empregados para aplicar a modulação que está contida em um sinal para o outro. A transferência de modulação é conseguida ao se alterar a fase de um dos ramos do interferômetro de tal maneira que, na saída da estrutura, ocorra a interferência destrutiva - não permitindo ao segundo sinal passar - ou construtiva, deixando apenas o segundo sinal passar. Assim como nos conversores XGM, estes conversores também apresentam duas configurações: co e contra-propagante. Os esquemas destes métodos estão ilustrados nas Figuras 3.4 (a) e (b), respectivamente.

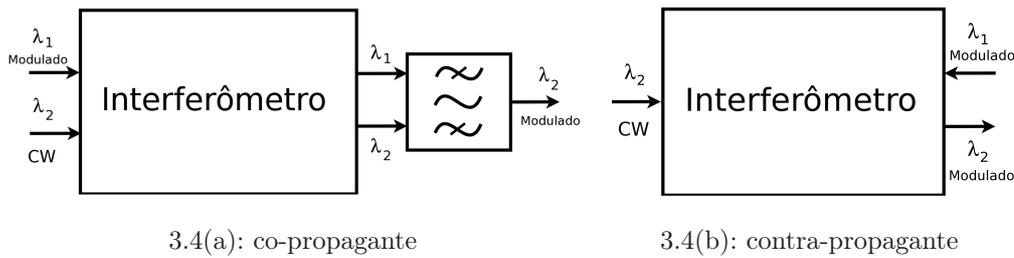


Figura 3.4: Método de modulação de fase cruzada para conversão de comprimento de onda.

Como a origem da modulação de fase imposta vem da modulação do índice de refração na região ativa, induzida pela saturação do ganho [2], este conversor é limitado pelo mesmo mecanismo que o anterior, o tempo de recuperação de ganho [7]. Também neste caso, uma potência maior de *probe* reduz este tempo, levando a taxas maiores de sinais convertidos [7]. Outras configurações de interferômetros, podem levar a taxas de 20 *Gbit/s* até acima de 100 *Gbit/s* [61, 63, 64].

Os conversores por XPM apresentam a possibilidade de *inverter* ou não a lógica do sinal de entrada, dependendo de como o interferômetro estiver polarizado [4, 5]. Outras diferenças do método anterior incluem a manutenção da razão de extinção para ambos comprimentos de onda maiores ou menores [6] e um baixo *chirp* imposto [8].

Uma característica deste tipo de conversor é que a curva de transferência de um interferômetro pode “limpar” o sinal de ruídos de amplitude [2, 4–6, 61, 65], melhorando a relação sinal-ruído e a razão de extinção do sinal. Outra característica é que, como o interferômetro altera a fase dos sinais nos ramos, este não pode converter sinais que sejam modulados em fase, apenas sinais AM - *Amplitude Modulation*. Além dessas, há também a possibilidade de sua resposta ser independente de comprimentos de onda [62, 66]. As características estão compiladas no Quadro 3.4.

**Quadro 3.4** Características de conversores de comprimento de onda do tipo modulação de fase cruzada.

Vantagens	Desvantagens
Facilmente integrável	Apenas conversão <i>unicast</i>
Melhora a razão de extinção	Limita-se a modulação AM
Pode não inverter o sinal	Apenas um sinal convertido
Melhora a relação sinal-ruído	
Baixo <i>chirp</i> imposto	
Baixas potências de <i>pump</i>	
Independente de comprimento de onda	

### 3.2.3

#### Mistura de quatro ondas

A resposta não-linear dos elétrons de um meio à aplicação de um campo óptico origina os chamados *processos paramétricos* [41]. Um destes é a *mistura de quatro ondas* ou FWM [1–8, 41, 42, 61]. FWM significa que dois sinais, em um meio não-linear, podem produzir frequências que não existiam antes no meio, os chamados produtos de intermodulação. É um fenômeno coerente [1, 4, 41]. Este efeito é bem rápido, ocorrendo em uma escala de tempo de 0.1 ps [2].

Neste tipo de conversão de comprimento de onda, há uma troca de energia entre as ondas incidentes no meio não-linear [41], e, como há a perda de energia dos sinais de entrada para o meio, há a formação de novas frequências.

O processo de FWM pode ser entendido como o espalhamento de dois fótons de energias  $h\nu_1$  e  $h\nu_2$ , que são destruídos e suas energias criam outros dois fótons de energias  $h\nu_3$  e  $h\nu_4$  tais que o momento e a energia se conservem [41]. Como o fenômeno é coerente, há a necessidade de que os sinais possuam casamento de fase - *Phase Matching* [5, 6, 41] e polarização controlada [2, 4, 7]. A necessidade do casamento de fase vem da conservação do momento [2]; apesar disto, em SOAs, esta condição é facilmente atingida [4]. Comumente ocorre o

caso *degenerado* de FWM, onde duas ondas de entrada criam uma outra [6] - este é conhecido por *Three-wave mixing*.

A amplitude das ondas geradas é proporcional ao produto das amplitudes das ondas de entrada [5, 7], enquanto a fase e a frequência das ondas resultantes são combinações lineares das fases e frequências de entrada [5, 7]; este fato é que faz este conversor ser independente do formato de modulação de entrada [5, 7]. Um diagrama resumido da técnica se encontra na Figura 3.5.

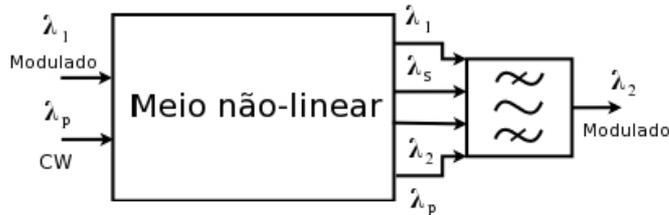


Figura 3.5: Método de mistura de quatro ondas para conversão de comprimento de onda.

Nos amplificadores ópticos semicondutores, há vários efeitos que estão relacionados ao FWM [4], e é a interação destes fenômenos que gera o efeito em SOAs [4, 5, 7]. Esta interação entre os efeitos físicos geradores do FWM é responsável pela variação brusca da eficiência de conversão deste método [4, 5, 7]; para pequenas diferenças de comprimento de onda entre as ondas de entrada, esta técnica apresenta eficiências de conversão maiores que para deslocamentos grandes em comprimentos de onda [4, 5, 7, 61]. Uma solução para aumentar a eficiência de conversão é aumentar o tamanho do SOA, com o limite ocorrendo quando a condição de casamento de fase não mais for atendida no amplificador [4]. Esta técnica também adiciona um ruído de fase no sinal convertido [6, 67], alargando o espectro do sinal convertido.

Uma conseqüência da criação de novas frequências é a possibilidade de se converter *vários* canais simultaneamente [2, 3, 5, 7, 42]. Uma outra característica do sinal convertido por esta técnica é a *inversão espectral* ou *conjugação de fase* [5, 6]. Isto pode ser utilizado para mitigar o efeito da dispersão do sinal em fibras ópticas [2–6].

Ademais, este conversor ainda pode ser regenerativo [6, 7, 68], i.e., pode fazer a reamplificação ou reformatação do pulso. O Quadro 3.5 resume as características desta técnica.

**Quadro 3.5** Características de conversores de comprimento de onda do tipo mistura de quatro ondas.

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Independente do formato de modulação	Depende de controle de polarização
Independente da taxa de modulação	Depende de casamento de fase
Pode converter vários canais	Baixa eficiência de conversão
Mantém a razão de extinção	Piora a relação sinal-ruído
Pode inverter o espectro	Faixa de conversão pequena
	Adiciona ruído de fase
	Depende da diferença entre comprimentos de onda