

## 5 Resultados experimentais

### 5.1 A montagem

Foram realizadas medidas clássicas, isto é não operamos no regime quântico, de um sistema de codificação por fase utilizando sistemas AM-AM e AM-PM.

Nosso sistema consistiu de um laser *DBR* (Refletor de Bragg Distribuído) de 3 secções centrado em 1517,14nm. Este laser além da entrada para modulação direta de corrente, possui outras duas para modulação de fase e ajuste do comprimento de onda de emissão. Para o sistema AM-AM foram utilizados dois moduladores MZ de  $\text{LiNbO}_3$  (Niobato de Lítio) *zero-chirp*, isto é o sinal óptico modulado na saída do MZ não possui *chirp*.

Foi utilizado o mesmo gerador de RF para os dois moduladores. Isto garante o sincronismo de fase e frequência entre Alice e Bob. No nosso sistema não foram utilizados moduladores de fase de RF, dessa forma as fases  $\varphi_1$  e  $\varphi_2$  serão constantes não influenciando nas intensidades das bandas laterais. Como o que nos interessa é a fase relativa entre Alice e Bob foi então variada a frequência da portadora de RF para que o termo de propagação  $(n/c)\Omega L$  gere a interferência necessária. Foi utilizado 1km de fibra padrão de forma que a dispersão cromática não se torne um problema. Mas de quanto temos que variar  $\Omega$  de forma que possamos obter um desvio de fase de  $2\pi$  entre Alice e Bob? A fase do sinal óptico é dada por  $kL$  e para obter um desvio de  $2\pi$  precisamos variar a portadora de RF em 200kHz. Se utilizarmos uma portadora de RF de frequência muito maior do que esse valor, essas pequenas variações de 200kHz não alterarão o resultado obtido, a menos da mudança da fase relativa que é o nosso objetivo. Utilizamos um valor para  $\Omega$  de 500MHz obedecendo a condição acima. Na prática as frequências utilizadas são mais elevadas devido à limitação dos filtros ópticos. Como queremos filtrar  $\omega_0 \pm \Omega$  quanto maior  $\Omega$  mais estreitos os filtros ópticos precisam ser. Na prática valores de pelo menos 2GHz são utilizados para  $\Omega$ . Não podemos utilizar valores muito elevados para  $\Omega$  pois isso fará com que a dispersão cromática torne-se um problema, separando as bandas laterais temporalmente e

retirando o sistema do sincronismo. Para a verificação desse procedimento foi utilizada uma linha de atraso variável em um dos cabos conectando um dos moduladores. Com isso conseguimos efetivamente mudar a fase do sinal de RF entre Alice e Bob. O mesmo efeito de interferência foi observado com a variação da portadora de RF. No entanto, mantivemos o esquema variando a frequência da portadora pois isso nos permitiu uma maior varredura do desvio de fase.

É impossível observar o sinal óptico com tão pequena separação espectral. Mesmo que utilizássemos  $\Omega = 10\text{GHz}$  ainda assim não seria possível distinguir as bandas laterais em um Analisador de Espectro Óptico (OSA). Utilizaremos então uma solução muito aplicada para a caracterização de larguras de linha de lasers, que é a geração de um batimento heteródino [28]. Nesse método utilizamos um laser sintonizável para gerar uma frequência de batimento compatível com a banda passante de um Analisador de Espectro Elétrico (ESA) (Figura 22).

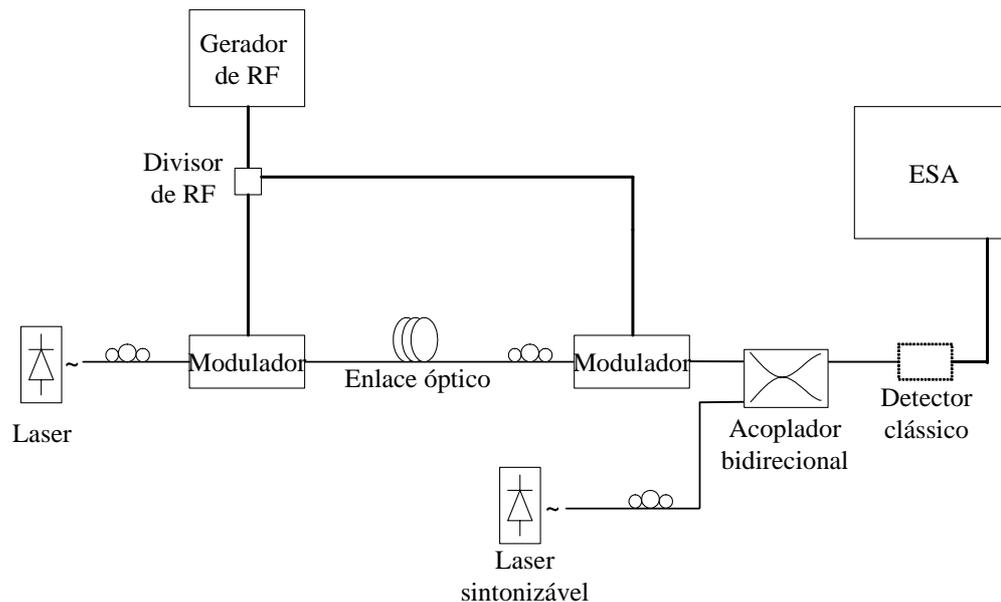


Figura 22: Esquema experimental utilizado nas medidas. Foram utilizados controladores de polarização para minimizar as perdas nos moduladores bem como para maximizar o acoplamento do laser sintonizável com o nosso sinal óptico

O sinal óptico na saída do acoplador bidirecional possui a frequência  $\omega_0 - \omega_1$  aonde  $\omega_1$  é a frequência óptica do laser sintonizável. Se trouxermos  $\omega_1$

para bem próximo de  $\omega_0$  podemos fazer com que a diferença entre eles esteja dentro da faixa de operação do ESA (até  $\sim 25\text{GHz}$ ). Com isso conseguimos observar o espectro com a resolução do ESA que é muito superior ao OSA. Os dados foram então retirados do ESA utilizando uma interface GPIB.

Como estamos variando a portadora de RF a frequência  $\Omega$  torna-se  $\Omega_0 + \delta$  onde  $\Omega_0$  é o tom senoidal de 500MHz enquanto  $\delta$  é a variação em torno de 500MHz. As equações para as intensidades das bandas laterais para o AM-AM e o AM-PM tornam-se:

$$I_{\pm} = \frac{E_0^2}{32} \cdot m^2 \left[ 1 + \cos\left(\frac{n}{c}(\Omega_0 + \delta)L - \Delta\phi\right) \right]. \quad (5.1)$$

$$I_{\pm} = \frac{E_0^2}{8} \left[ \frac{m_1^2}{4} + m_2^2 \mp m_1 m_2 \cdot \sin\left(-\frac{n}{c}(\Omega_0 + \delta)L + \Delta\phi\right) \right]. \quad (5.2)$$

## 5.2 Sistema AM-AM

Inicialmente foram obtidos os espectros para três casos de  $\Delta\phi$  :  $0$ ,  $\pi/2$  e  $\pi$ :

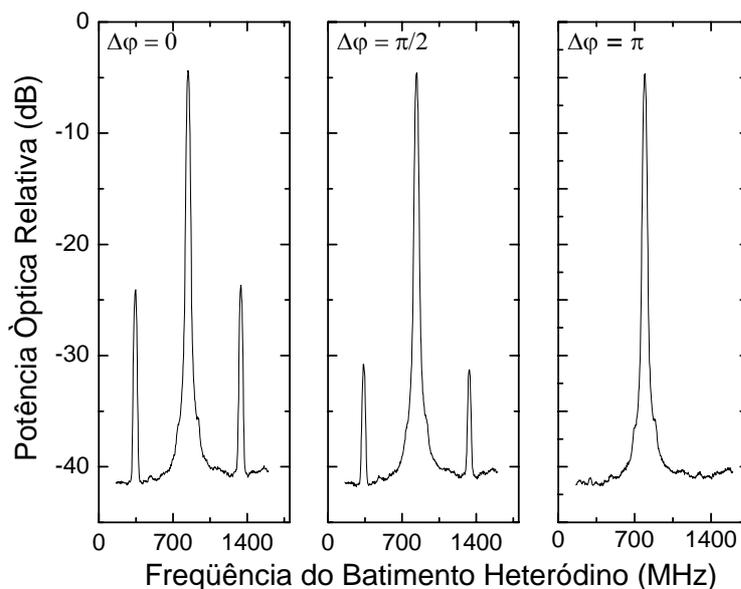


Figura 23: Espectro obtido a partir do ESA para o sistema AM-AM. O pico central corresponde à frequência  $\omega_0$  enquanto as bandas laterais às frequências  $\omega_0 \pm \Omega$ .

Através da figura 23 podemos observar o comportamento do sistema. Como pode ser visto obtemos intensidade máxima nas bandas laterais quando  $\Delta\phi = 0$  e mínima quando  $\Delta\phi = \pi$ . Também obtemos o caso intermediário quando  $\Delta\phi = \pi/2$ . A outra situação intermediária ( $\Delta\phi = 3\pi/2$ ) foi omitida aqui apenas para deixar mais fácil a leitura do gráfico, visto que ela é exatamente equivalente ao espectro de  $\Delta\phi = \pi/2$ .

Também foi medida a evolução de cada banda lateral em função do deslocamento de fase gerado por Alice e Bob através do desvio de frequência  $\delta$  (Figura 24), lembrando que para um deslocamento de  $2\pi$  na fase, precisamos de um desvio de frequência de 200kHz para 1 km de fibra. Foi utilizado um passo de 5kHz.

Foram utilizados atenuadores discretos de RF nos cabos ligando os geradores de RF aos moduladores numa tentativa de fazer com que as profundidades de modulação sejam iguais.

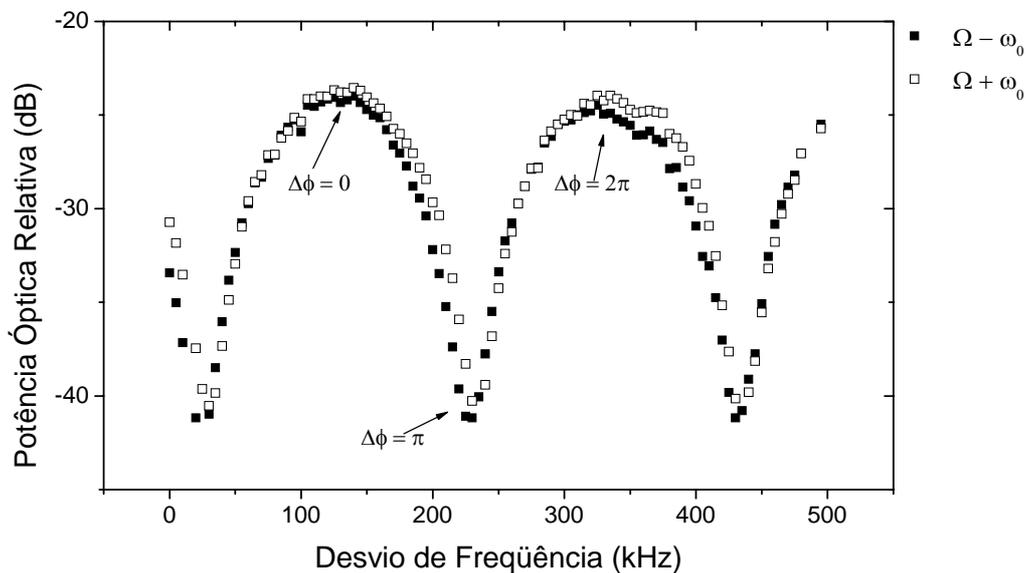


Figura 24: Evolução da intensidade das bandas laterais em função do desvio de frequência imposto por Alice e Bob para o sistema AM-AM. As setas indicam os desvios de fase correspondentes.

As intensidades realmente correspondem as expressões (4.29) e (4.30). A razão de extinção obtida é de aproximadamente 16dB para ambas as bandas.

### 5.3 Sistema AM-PM

Como modulador de fase foi utilizado o próprio laser DBR em Alice. Logo o modulador de Alice estará contido dentro do laser. Bob utilizará o mesmo modulador MZ da medida anterior. Na realidade o sistema é então PM-AM, mas que opera da mesma forma do que o AM-PM. Na figura seguinte (25) estão dispostos os espectros para os mesmos três valores de  $\Delta\varphi$  que na medida anterior:

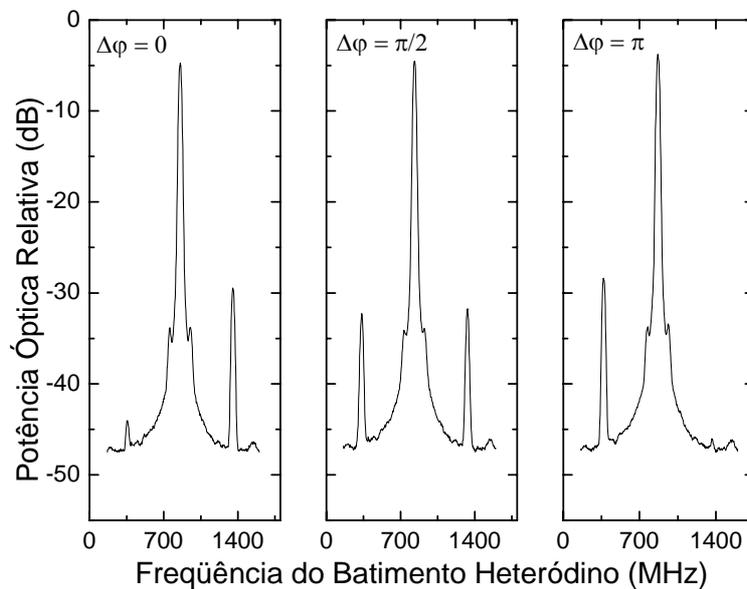


Figura 25: Espectros para o sistema AM-PM.

A razão pelo qual a banda inferior não se extingue tanto quanto a superior é devido a discretização da medida. Tanto nessa medida como para a do sistema AM-AM foram utilizados passos de 5kHz. Nesse caso não sabemos qual ponto das curvas de evolução das intensidades (Eqs. 4.32 e 4.33) é o nosso ponto de partida. Caso a medida fosse contínua veríamos uma discrepância menor do que a vista na figura 25.

Finalmente, a figura 26 mostra a evolução das intensidades das bandas laterais para o sistema AM-PM. As razões de extinção obtidas são de aproximadamente 17 e 18dB para as bandas superior e inferior respectivamente.

## 5.4 Comentários

Inicialmente, quando o sistema estava sendo montado foi feita uma medida AM-AM utilizando um laser com modulador de EA (Electro-Absorção) integrado funcionando como modulador de amplitude em Alice, com Bob utilizando o modulador MZ. Surpreendentemente o sistema comportou-se como AM-PM. O resultado dessa medida preliminar está disposto na figura 27.

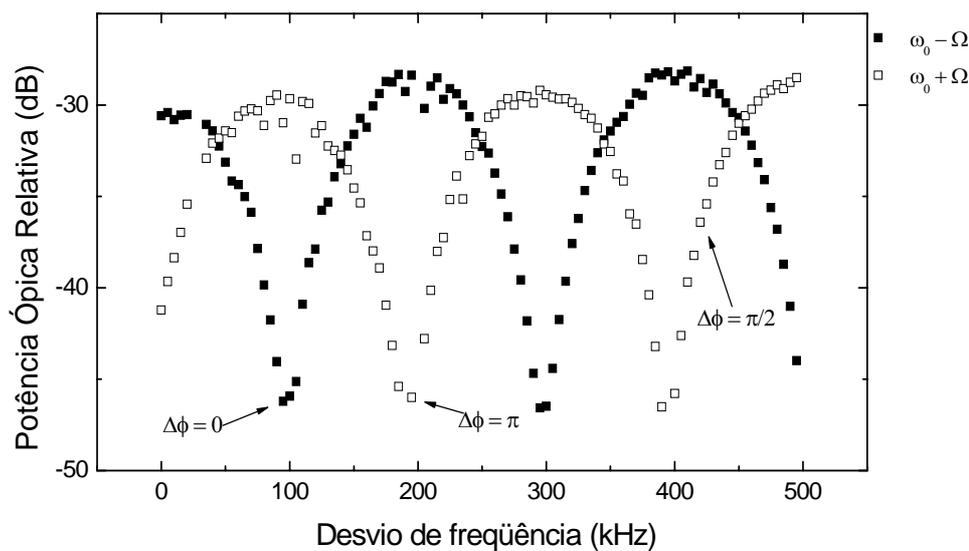


Figura 26: Evolução das intensidades em função do desvio de frequência do sistema AM-PM.

A razão desse resultado está ligada justamente ao modulador de EA. É verdade que ele é um modulador de amplitude, mas ele invariavelmente gera um sinal óptico com *chirp*. Esse *chirp*, que é proposital para compensar 80 km de fibra padrão (laser para aplicação em telecomunicações), gera um desvio de fase no sinal, ou seja, o sinal é modulado em amplitude e em fase simultaneamente.

Essa combinação faz com que as bandas evoluam complementarmente. O resultado é desigual devido à combinação de amplitude e fase, de forma que é difícil obter a equalização das razões de extinção das bandas laterais. Possivelmente com a utilização de moduladores MZ com *chirp* esse efeito possa ser observado.

Seguindo a mesma linha de pensamento foi feita uma tentativa de modulação direta da corrente do laser. Sabemos que isso produz um considerável alargamento da largura de linha do laser devido ao *chirp* [15]. O sistema se comportou novamente como o AM-PM, até melhor do que o esquema anterior utilizando modulador de EA. Isso ocorre pois a modulação direta produz mais *chirp* do que utilizando o modulador externo de EA. Assim sendo, o efeito de modulação de fase é mais pronunciado.

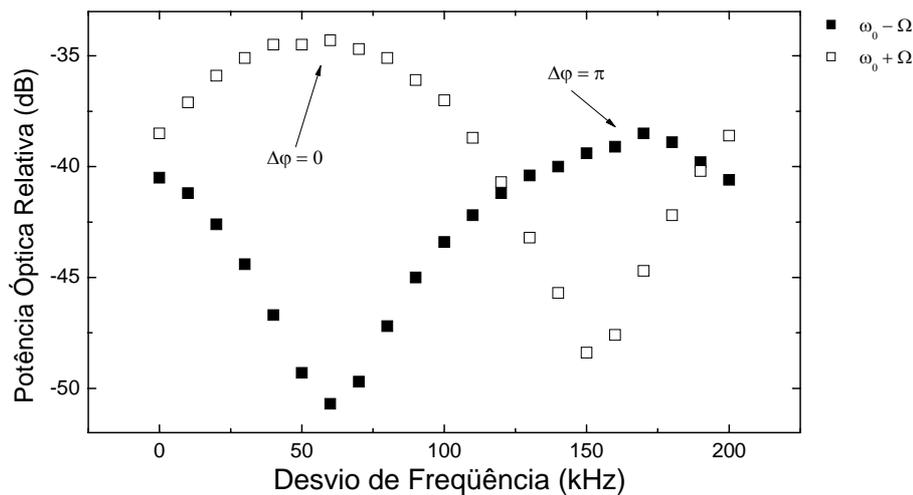


Figura 27: Evolução da intensidade das bandas laterais para um sistema AM-AM utilizando um modulador de EA em Alice.

No sistema montado pelo grupo da Universidade de Franche-Comté, [25] e [26], que é um sistema AM-AM, a possível razão para eles terem observado as bandas evoluírem complementarmente pode ter sido a utilização de moduladores MZ com *chirp* ou de um laser modulado diretamente em Alice para a medida clássica. Na medida quântica eles utilizaram apenas um SPAD, aplicando o

protocolo B92 ou BB84 modificado, não tomando vantagem da utilização do BB84 clássico.

Finalmente, o sistema de QKD irá operar em modo pulsado, com o laser produzindo pulsos da ordem de 10ns, com uma frequência máxima de repetição de até aproximadamente 1 MHz. É importante saber se a relação entre largura de pulso e frequência de RF é tal que, um fóton emitido do laser dentro da estreita janela do pulso, será efetivamente modulado. Em outras palavras,  $\Omega$  deve ser muito maior do que a frequência correspondente a janela do pulso de 10ns. No sistema de QKD, com codificação de frequência,  $\Omega$  deve ser maior do que aproximadamente 3 GHz, para tornar os filtros ópticos que irão separar as bandas laterais do pico central fisicamente realizáveis, logo permitindo pelo menos 30 ciclos de  $\Omega$  em uma janela de pulso. Foi realizado um teste similar para essa situação, operando nosso sistema (novamente de forma clássica) para duas possíveis janelas de pulso (50 e 100ns, correspondendo a 25 e 50 ciclos de  $\Omega$  respectivamente) para nossa frequência de RF de 500 MHz. A figura 28 mostra as intensidades para o sistema AM-AM, operando em modo pulsado, em função do desvio de frequência, enquanto a figura 29 representa as intensidades para o sistema AM-PM sob as mesmas condições. Como pode ser observado a partir dessas figuras, esses dois esquemas operam da mesma forma que em modo CW, exceto pelo fato que a potência óptica é menor, pois o laser não fica ligado constantemente.

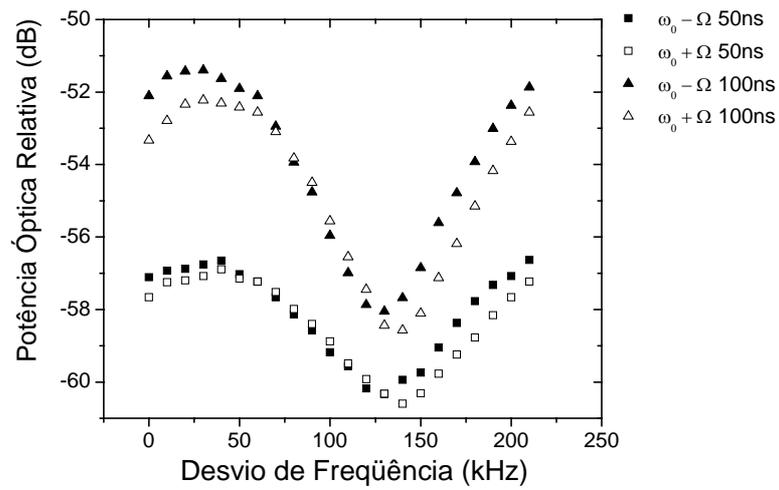


Figura 28 – Intensidades para as bandas laterais para o esquema AM-AM operando em modo pulsado.

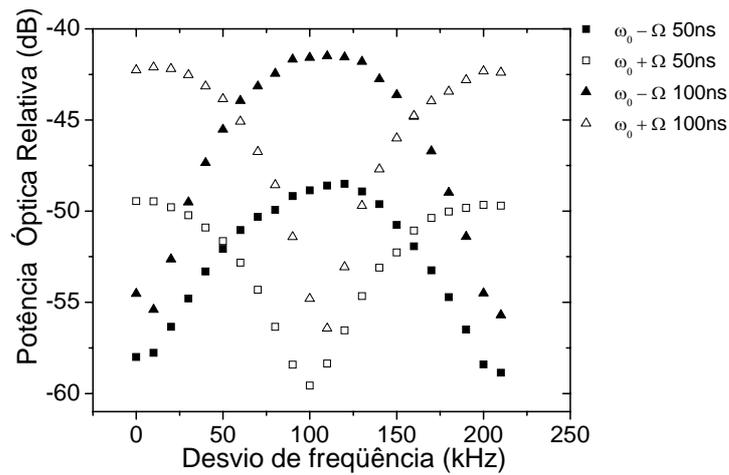


Figura 29 – Análoga à figura 28, porém para o esquema AM-PM.