

## 6. Procedimentos de medição e resultados sistêmicos

Foram realizadas diversas medições no regime clássico e no regime quântico, reunidas em três grupos, a saber, as medições com excursão de frequência, as medições com chaveamento de fase pelos moduladores QPSK e as medições com o enlace de sincronismo por WDM. Em cada um desses grupos, as medições clássicas consistem em espectros ópticos qualitativos e quantitativos, enquanto que as medições quânticas darão origem a curvas de contagem de fótons que possibilitarão o cálculo da QBER.

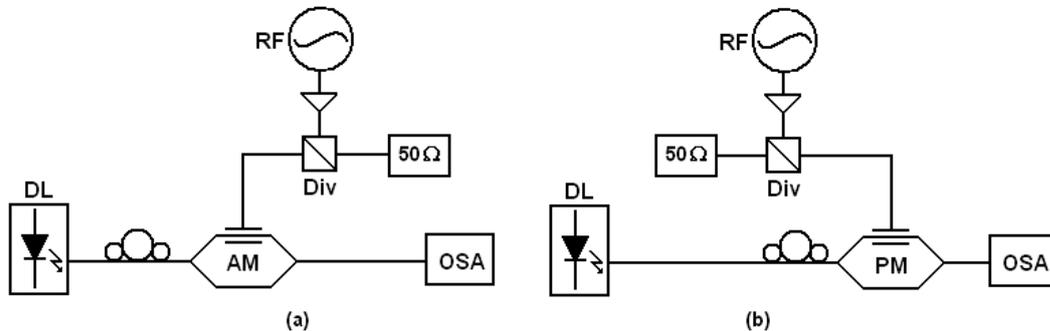
### 6.1. Medições com excursão de frequência

O objetivo dessas medições é mostrar experimentalmente a possibilidade de se conseguir uma razão de contraste satisfatória entre as bandas laterais da codificação dos qubits em frequência utilizando o conceito da dupla modulação AM-PM associado à filtragem e separação espectral, bem como determinar a frequência ótima de operação para as medições posteriores. A variação de fase do sinal de RF, cujo gerador está sendo, neste ponto do experimento, compartilhado por Alice e Bob, é simulada com a excursão de sua frequência, devido ao fato de os caminhos elétricos e ópticos se manterem fixos.

#### 6.1.1. Medições clássicas

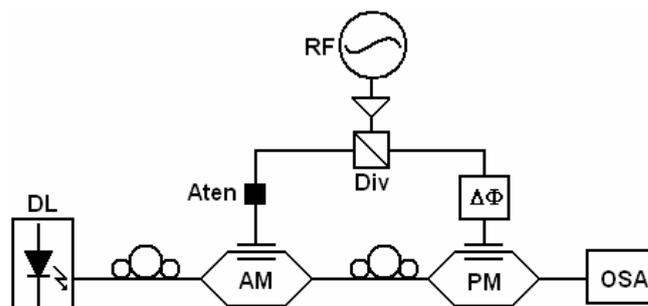
Inicialmente foi montada a configuração da modulação AM, como na figura 36a. O sinal óptico proveniente do laser (DL) é modulado, após passar por um controlador manual de polarização, por um modulador tipo Mach-Zehnder em niobato de lítio de acordo com um sinal de rádio-freqüência que, após sair do gerador de RF é amplificado e dividido. A segunda saída do divisor (Div) foi casada com uma terminação de  $50\Omega$  para evitar reflexões. A tensão de polarização do modulador foi ajustada e, o espectro óptico, observado no OSA.

Substituindo-se o modulador de amplitude por um modulador de fase, como na figura 36b, observou-se novamente o espectro óptico.



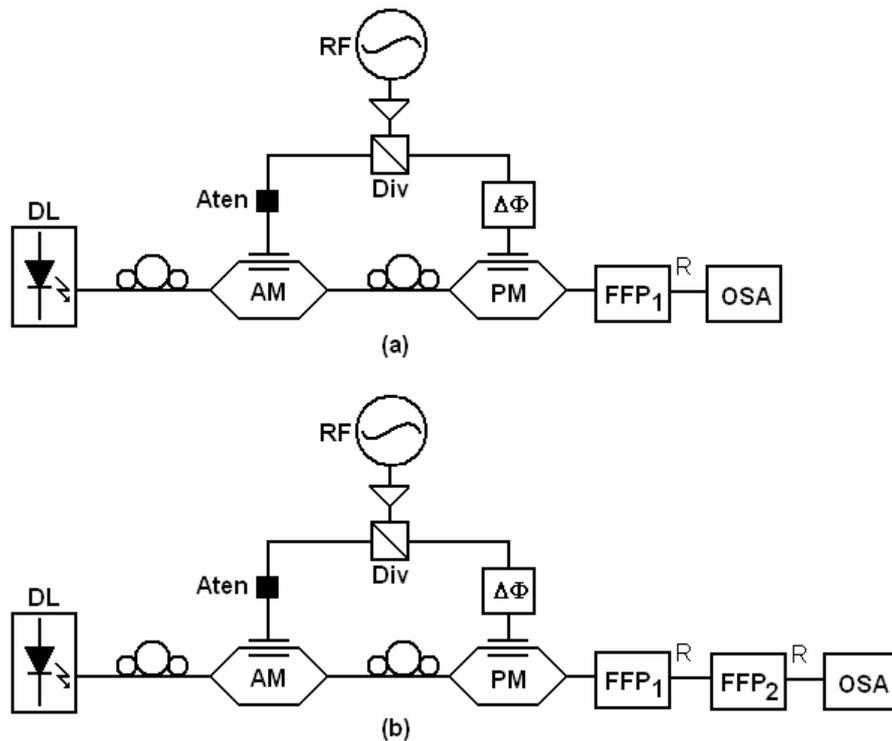
**Figura 36:** Montagem da seção de modulação em amplitude (a) e da seção de modulação em fase (b).

A montagem do sistema AM-PM foi então realizada (figura 37), após o balanceamento adequado da potência do sinal de rádio-freqüência modulante mediante o acréscimo de um atenuador (Aten) no caminho do sinal elétrico para o modulador AM, para que as profundidades de modulação em amplitude e de modulação em fase fossem idênticas, permitindo uma razão de extinção de banda lateral ótima. Um estube ( $\Delta\Phi$ ) foi introduzido no caminho da RF, precedendo o modulador de fase, possibilitando um ajuste fino da fase do sinal. Cuidado foi tomado em relação aos caminhos do sinal de RF, igualando-se o percurso “gerador de RF – modulador AM – modulador PM” ao percurso “gerador – estube – modulador PM”, de forma que a fase de ambos os sinais, ao chegarem ao modulador de fase, fossem adequadas. Foram obtidos os espectros ópticos para uma seqüência de valores da RF.



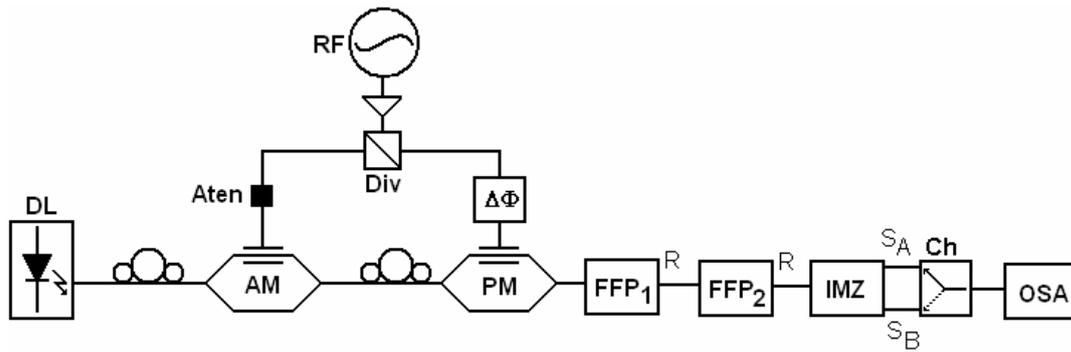
**Figura 37:** Montagem do sistema de dupla modulação AM-PM.

Tendo sido verificada a supressão de banda lateral, foi inserido no sistema o filtro de Fabry-Perot com redes de Bragg ( $FFP_1$ ) após o modulador PM, como na figura 38a. Após sintonização da temperatura e, conseqüentemente, de seu posicionamento espectral, sua saída R foi observada no OSA. O comprimento de onda do laser de sinal foi ajustado de modo a obter o máximo de rejeição da portadora. Foram medidos espectros ópticos e adicionado um segundo filtro idêntico ao anterior ( $FFP_2$ ) em série com aquele, como na figura 38b, resultando em novos espectros.



**Figura 38:** Sistema AM-PM com filtragem da portadora óptica na recepção por (a) um filtro e (b) por dois filtros em série.

A saída de reflexão foi conectada ao interferômetro de Mach-Zehnder (IMZ), de acordo com a figura 39. Com o ajuste adequado da temperatura, as bandas laterais, afastadas entre si de uma frequência de 20,616GHz, ou seja, o dobro da RF modulante, foram posicionadas em um máximo e em um mínimo de transmissão para cada saída, de forma complementar. Uma chave óptica (Ch) possibilitou a seleção da porta de interesse ( $S_A$  ou  $S_B$ ) do interferômetro para aquisição dos espectros, sem a necessidade de desconexão.

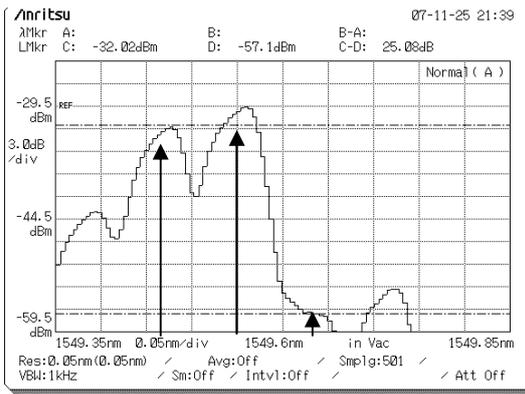


**Figura 39:** Sistema AM-PM com filtragem da portadora óptica e separação das bandas laterais na recepção, com seleção de leitura pela chave óptica.

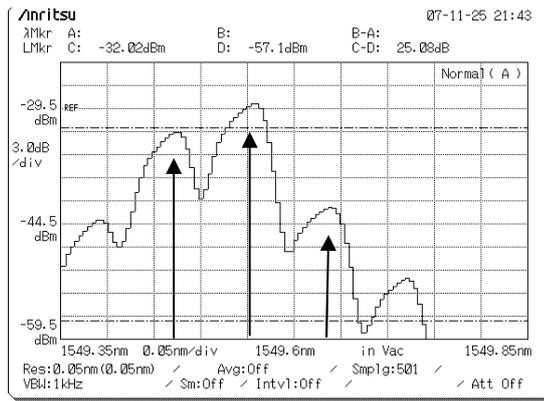
#### 6.1.1.1. Resultados

Nas figuras abaixo são apresentados os resultados das medições espectrais descritas anteriormente. Na figura 40 é mostrada a evolução das bandas laterais do sistema AM-PM ao se variar a RF em passos de 1MHz entre as frequências 10303 e 10308MHz.

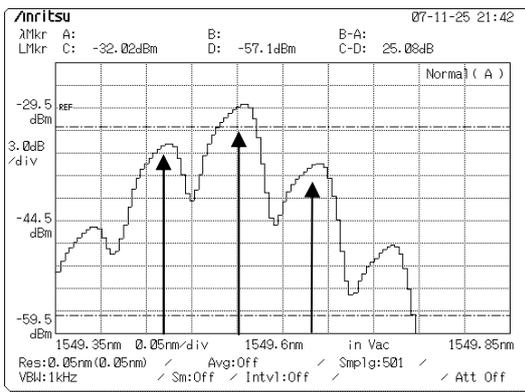
A conseqüente variação no comprimento de onda do sinal modulante em relação ao caminho eletro-óptico fixo faz com que a fase relativa entre os sinais que chegam ao modulador de fase se altere, permitindo que haja interferência construtiva ou destrutiva das bandas laterais. O correto ajuste dos caminhos do sinal, das profundidades de modulação AM e PM, do estube e da tensão de polarização do modulador de amplitude, propiciaram, como se vê na figura 40, uma razão de contraste de 25dB entre a banda lateral esquerda e a banda lateral direita nas frequências 10303 e 10308MHz, enquanto que, nos demais espectros, são vistos valores intermediários de contraste.



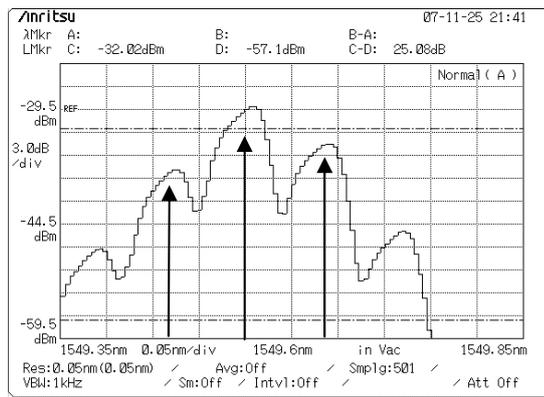
(a) 10303MHz



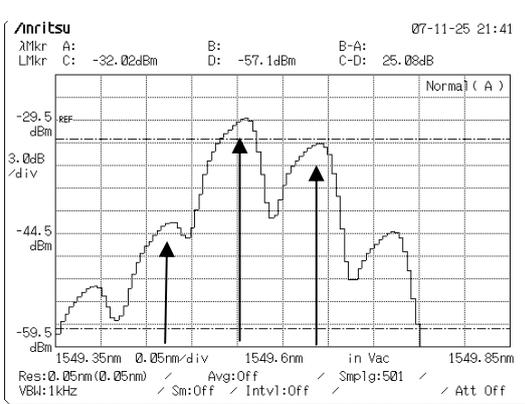
(b) 10304MHz



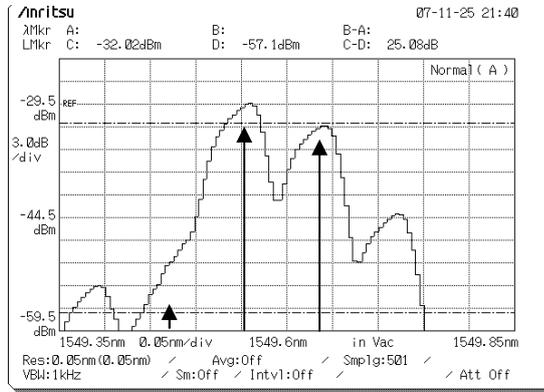
(c) 10305MHz



(d) 10306MHz



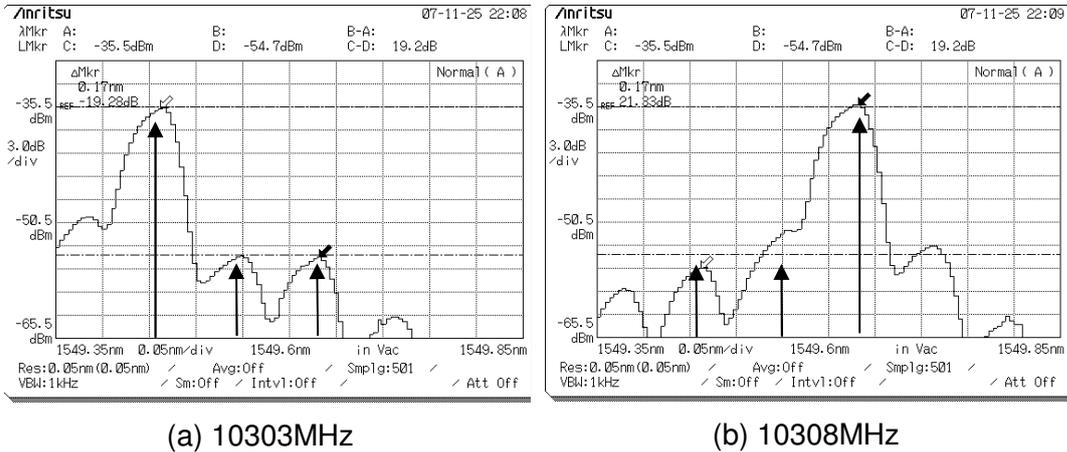
(e) 10307MHz



(f) 10308MHz

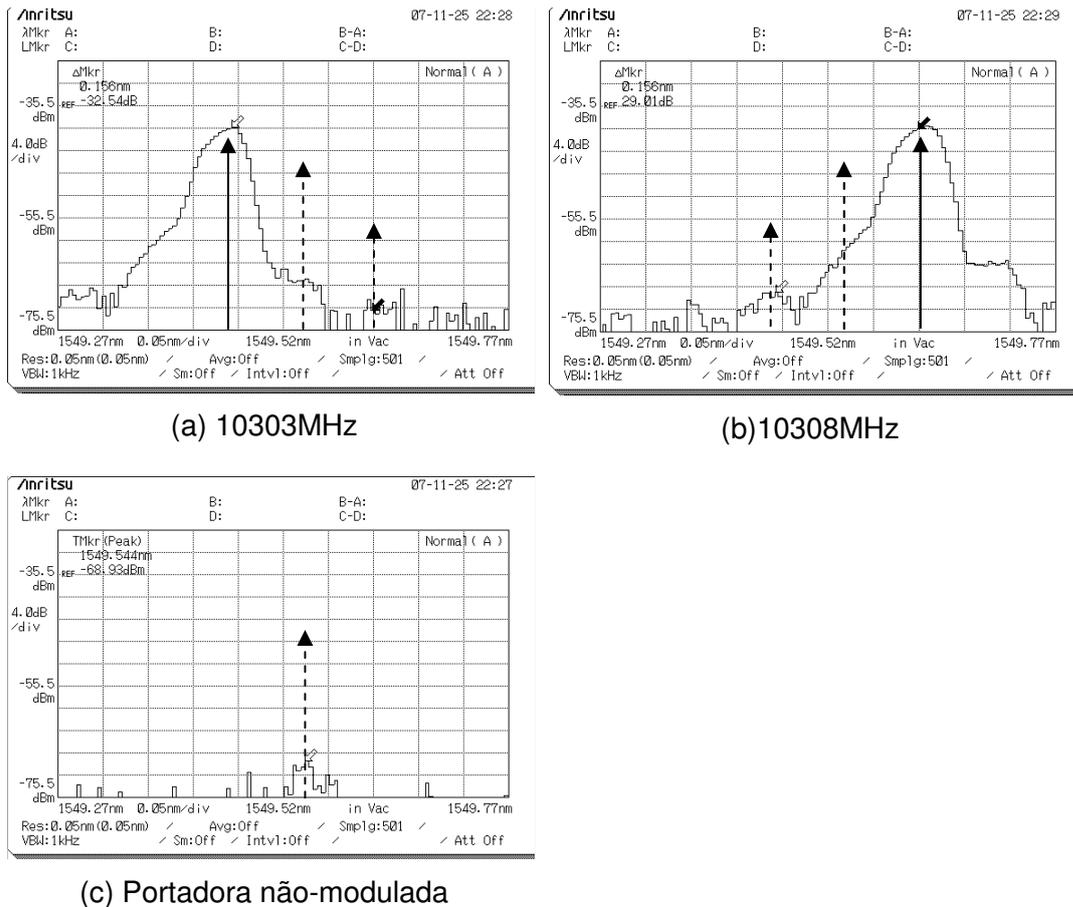
**Figura 40:** Espectros ópticos do sistema AM-PM para freqüência de RF variando de 10303 a 10308MHz, respectivamente de (a) a (f). Observa-se a supressão da banda lateral direita na figura (a), enquanto que a banda lateral esquerda é suprimida na figura (f). As demais figuras apresentam estados intermediários.

Na figura 41 são mostrados os espectros ópticos do sistema AM-PM com filtragem da portadora pelo FFP<sub>1</sub> para os casos de supressão da banda lateral direita e da banda lateral esquerda, com a rádio-freqüência ajustada em 10303 e 10308MHz respectivamente.



**Figura 41:** Espectros ópticos do sinal AM-PM passando pelo FFP<sub>1</sub>, com RF igual a 10303MHz (a) e 10308MHz (b), com supressão da portadora óptica.

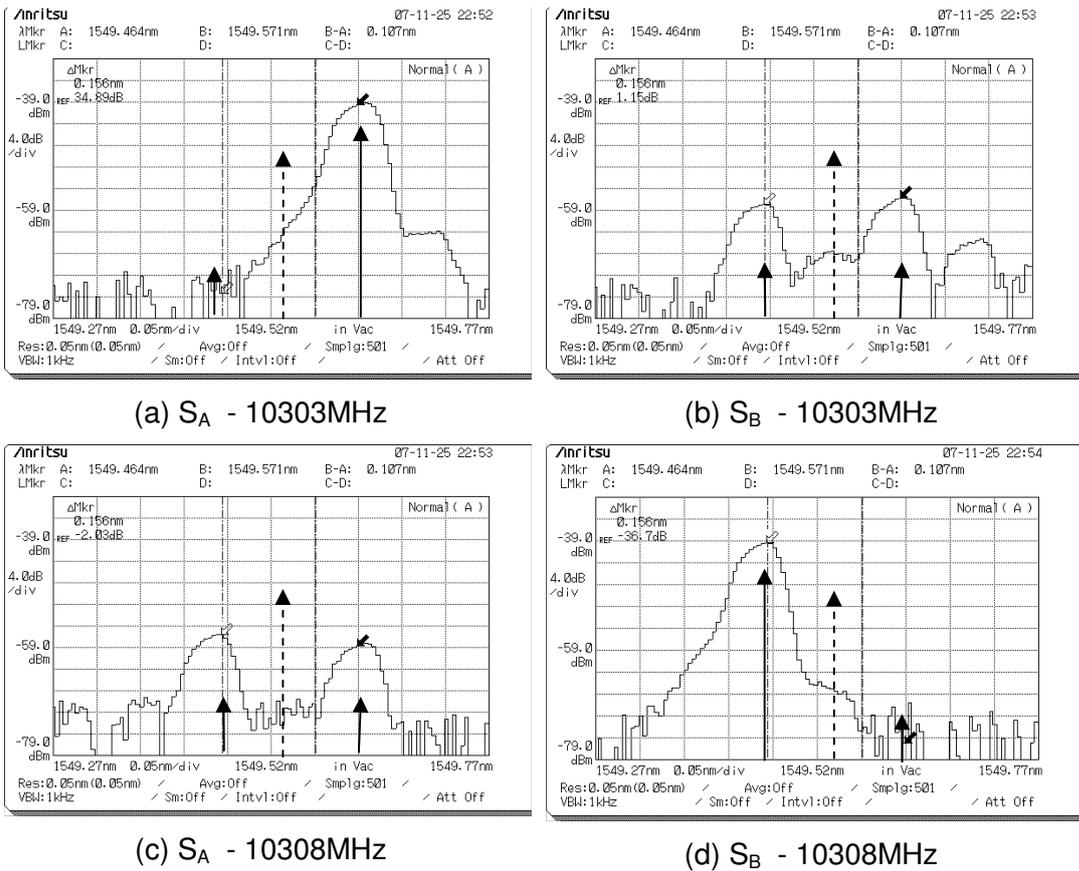
Na figura 42 vêem-se os espectros ópticos da configuração AM-PM com filtragem da portadora pelos dois FFP dispostos em série, com a RF ajustada em 10303MHz, 10308MHz e desligada (apenas portadora óptica não-modulada). Observa-se que, na figura (c), a portadora óptica encontra-se com potência próxima ao ruído de fundo do analisador de espectro óptico, devido à rejeição extra provida pelo segundo filtro.



**Figura 42:** Espectro óptico do sinal AM-PM passando pelos FFP<sub>1</sub> e FFP<sub>2</sub>, com (a) banda lateral direita suprimida, (b) banda lateral esquerda suprimida e (c) apenas portadora óptica filtrada (sinal não modulado).

Na figura 43 são vistos os espectros ópticos às saídas  $S_A$  (coluna esquerda) e  $S_B$  (coluna direita) do IMZ, após dupla modulação AM-PM e filtragem da portadora pelos FFP, para as frequências de 10303MHz (linha superior) e 10308MHz (linha inferior).

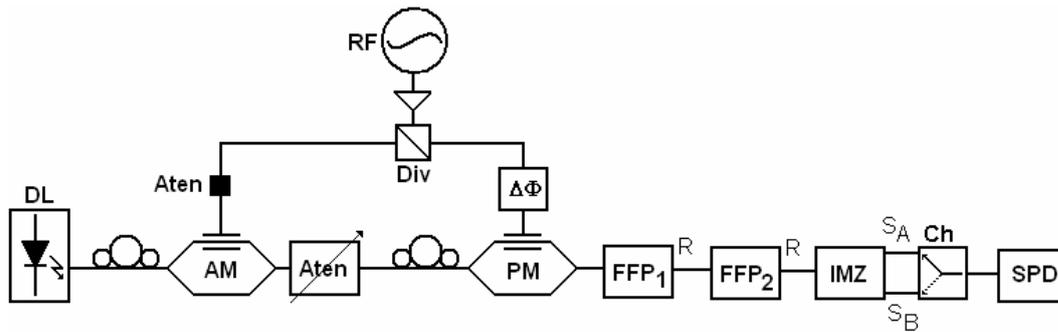
Observa-se que tais resultados simulam as escolhas de base por Alice e Bob com a combinação correta, ou seja, bases de preparação e de medição compatíveis, com a identificação de bit 0 ou de bit 1 associadas a uma ou outra banda lateral. As figuras (a) e (d) representam as saídas do sistema que deverão fazer com que haja contagem no SPAD<sub>1</sub>, enquanto que as figuras (b) e (c) mostram o ruído de fundo do sistema que poderão ocasionar falsas contagens no SPAD<sub>2</sub>.



**Figura 43:** Espectros ópticos às saídas  $S_A$  e  $S_B$  do IMZ para RF em 10303MHz (a e b) e 10308MHz (c e d).

### 6.1.2. Medições quânticas

Após a montagem inicial do experimento e comprovação clássica de seu correto funcionamento, foram efetuadas medições no regime quântico. Para isso, foi adicionado um atenuador óptico após o modulador de amplitude e substituiu-se o OSA pelo contador de fótons (SPD), como na figura 44.



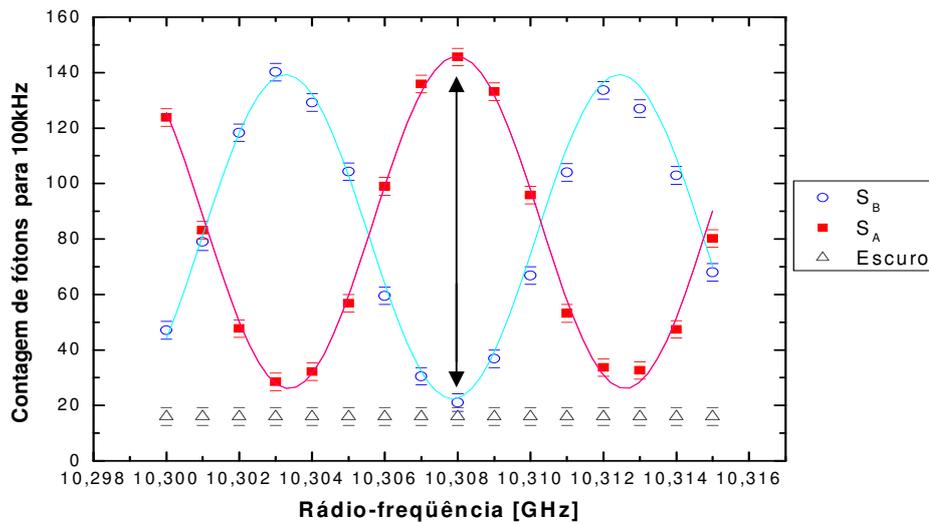
**Figura 44:** Montagem experimental do sistema com excursão de frequência para medições no regime quântico.

O atenuador foi ajustado para 55dB, reduzindo a potência óptica do sinal enviado por Alice a -76dBm, entrando no regime quântico de 0,5 fótons por pulso em média. Este valor se justifica pelo fato de o SPAD ser ruidoso, de modo que sua redução afogaria as contagens na região de escuro, mascarando as medições. Além disso, como a portadora óptica encontra-se com potência cerca de 7dB superior à das bandas laterais, estas apresentam valor próximo de 0,2 fótons por pulso.

A frequência do gerador de RF foi varrida entre 10300MHz e 10315MHz com passos de 1MHz, obtendo-se contagens para cada valor e para cada saída ( $S_A$  e  $S_B$ ) do sistema. Com o laser desligado, obteve-se também a contagem de escuro do SPD. O tempo de medição de cada intervalo de contagens pelo detector foi ajustado em 10s e sua janela de gatilho em 2,5ns, tendo sido feitas três contagens para cada valor de frequência, a uma taxa de repetição de 100kHz.

### 6.1.2.1. Resultados

São apresentadas na figura 45 as contagens de caracterização do sistema, obtidas às duas saídas do IMZ. A fase da rádio-freqüência foi mantida fixa, tomando-se as medidas para diferentes valores de frequência do gerador de RF, variados entre 10300 e 10315MHz com passo de 1MHz, podendo-se observar um padrão senoidal. São mostrados os valores médios de cada medição, seu desvio-padrão e a contagem de escuro do SPAD.



**Figura 45:** Contagem de fótons para as duas portas de saída do sistema com excursão de RF e a contagem de escuro. Nota-se maior razão de contraste na freqüência de 10,308GHz. Círculos: saída B; quadrados: saída A; triângulos: escuro.

Com esta medição, escolhe-se a freqüência de operação de 10308Mz para as próximas etapas, pois esta gerou a maior razão de contraste entre as bandas laterais (máximo e mínimo das curvas  $S_A$  e  $S_B$ ), de aproximadamente 14%, com visibilidade igual a 74,8%.

Caso o detector apresentasse menos ruído de escuro (uma ordem de grandeza inferior, como é comumente encontrado), a razão de contraste e a visibilidade subiriam para 5,3% e 90,9% respectivamente. Será visto adiante a possibilidade de obtenção de melhores resultados com ajuste mais preciso dos elementos do sistema.

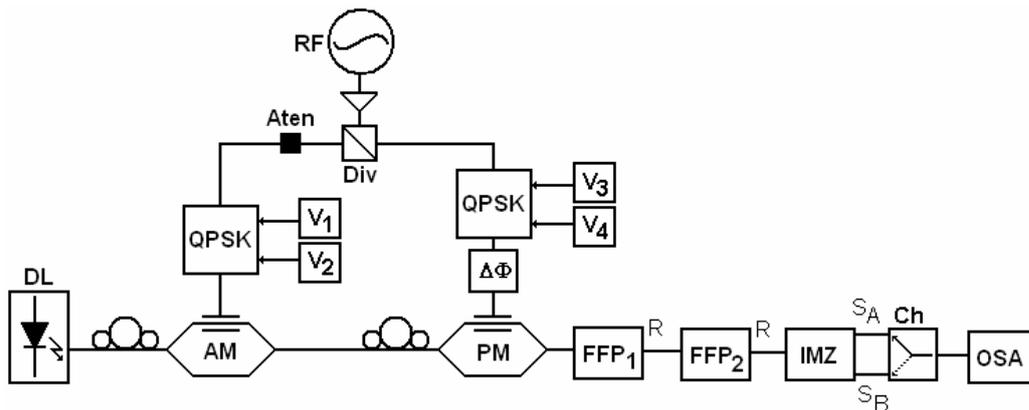
## 6.2. Medições com chaveamento de fase

Após definir a rádio-freqüência de operação como 10308MHz, foram acrescentados ao sistema os moduladores QPSK. A rádio-freqüência foi mantida fixa, enquanto a fase foi variada de acordo com as possibilidades de codificação dos qubits segundo o protocolo BB84, ou seja, 0 ou  $\pi$  (base  $\alpha$ ) e  $\pi/2$  ou  $3\pi/2$  (base  $\beta$ ) para o transmissor e 0 (base  $\alpha$ ) ou  $\pi/2$  (base  $\beta$ ) para o detector.

Neste ponto do experimento ainda é utilizado o mesmo sinal dividido a partir do gerador de RF tanto para a Alice quanto para Bob. Esta configuração tem como objetivo ajustar os elementos do sistema para que o enlace de sincronismo possa ser posteriormente implementado.

### 6.2.1. Medições clássicas

Acrescentando-se à configuração da figura 39 os moduladores QPSK, obtém-se o sistema mostrado na figura 46, do qual foram extraídas novas medidas. Com a frequência do gerador de RF fixada em 10308MHz, foram feitas novas medições espectrais. As fases de RF para codificação foram escolhidas ajustando-se as tensões  $V_1$  e  $V_2$  para Alice e  $V_3$  e  $V_4$  para Bob em níveis lógicos TTL, de acordo com a constelação da figura 30.

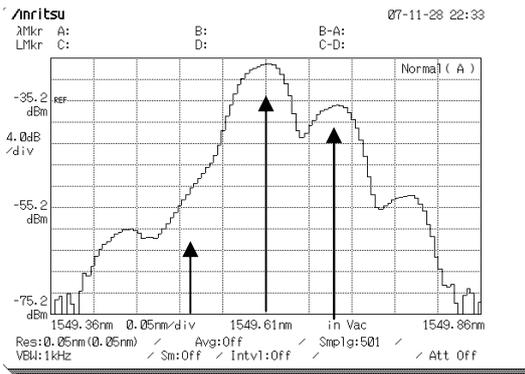


**Figura 46:** Sistema compartilhando o mesmo gerador de RF com adição dos moduladores QPSK.

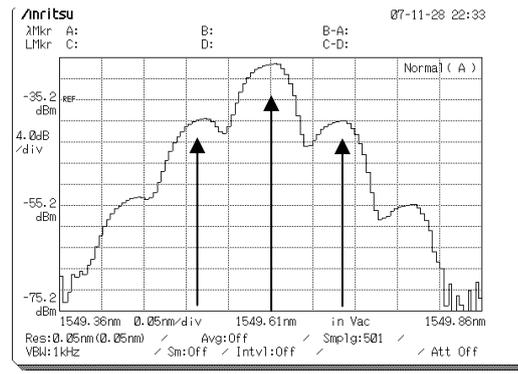
As medições foram feitas de forma similar às anteriores, com ajuste progressivo dos elementos constituintes do sistema.

#### 6.2.1.1. Resultados

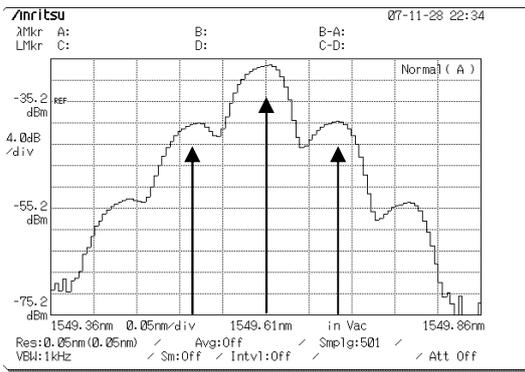
Na figura 47 são mostrados os espectros do sistema AM-PM para as possíveis combinações de fase dos QPSK de Alice e de Bob.



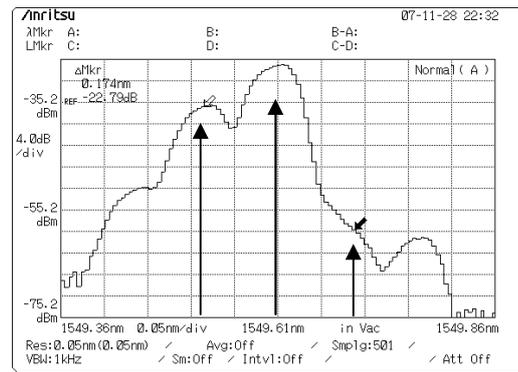
(a)  $(0,0)$



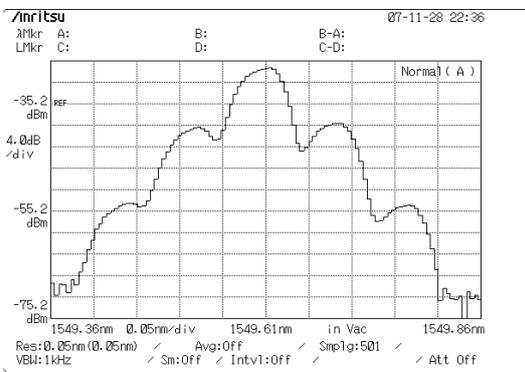
(b)  $\left(0, \frac{\pi}{2}\right)$



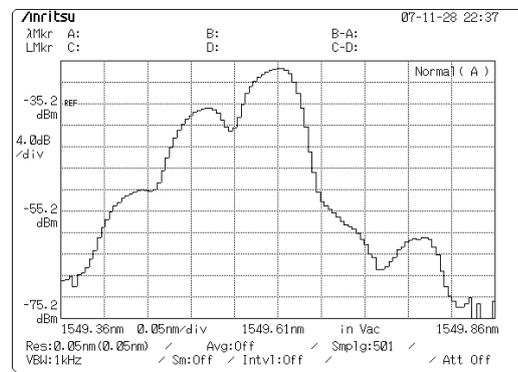
(c)  $\left(0, \frac{3\pi}{2}\right)$



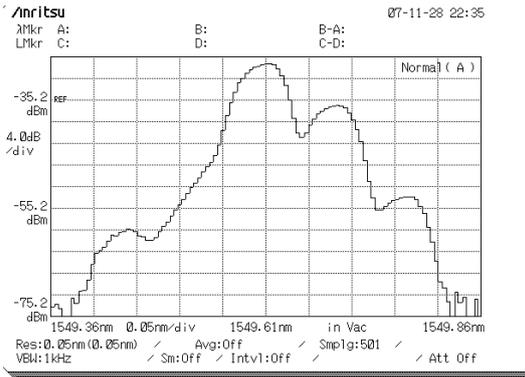
(d)  $(0, \pi)$



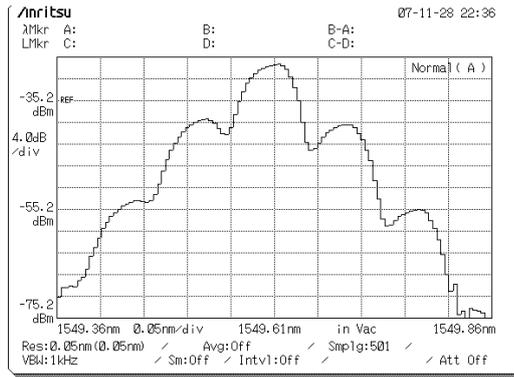
(e)  $\left(\frac{\pi}{2}, 0\right)$



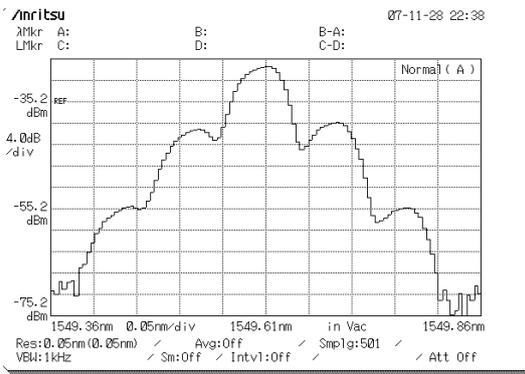
(f)  $\left(\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right)$



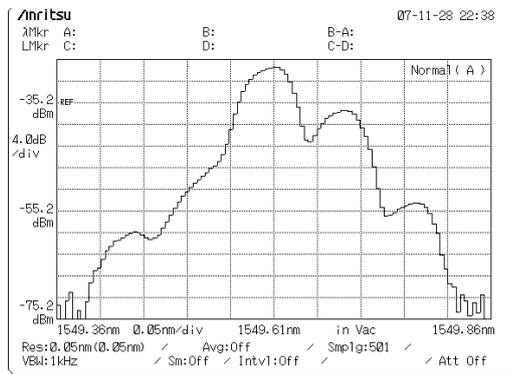
$$(g) \left( \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2} \right)$$



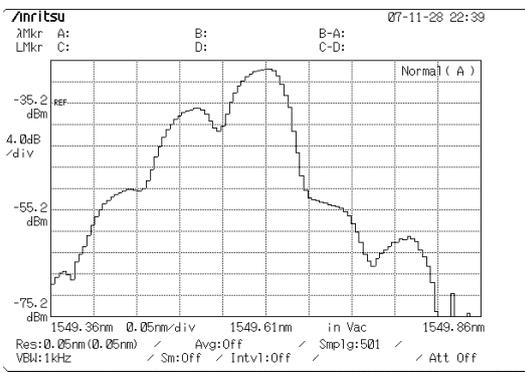
$$(h) \left( \frac{\pi}{2}, \pi \right)$$



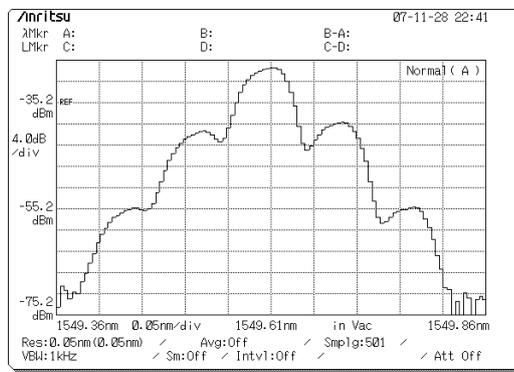
$$(i) \left( \frac{3\pi}{2}, 0 \right)$$



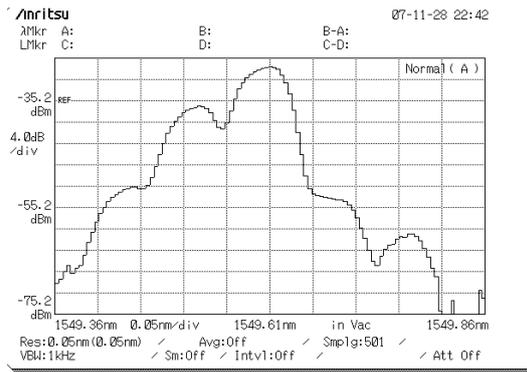
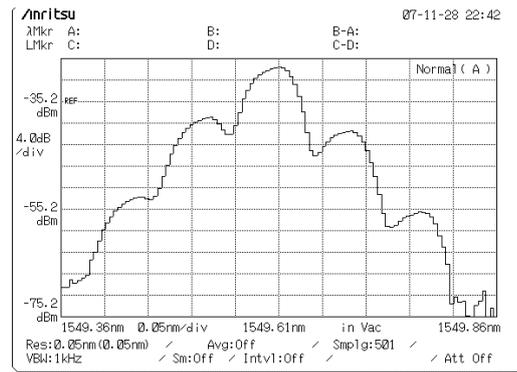
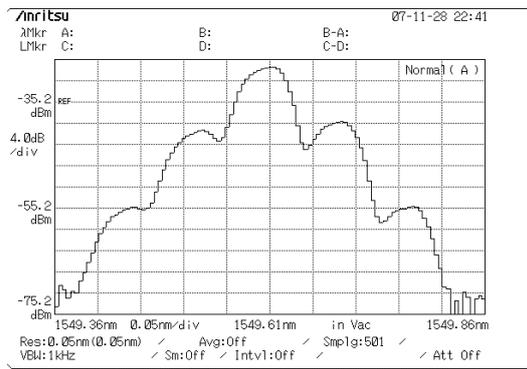
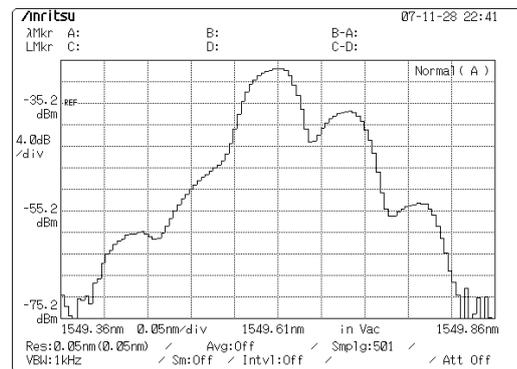
$$(j) \left( \frac{3\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right)$$



$$(l) \left( \frac{3\pi}{2}, \frac{3\pi}{2} \right)$$



$$(m) \left( \frac{3\pi}{2}, \pi \right)$$

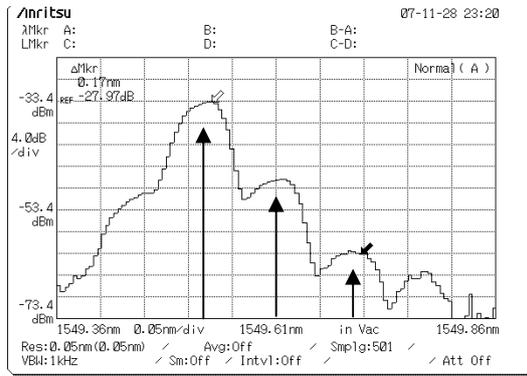
(n)  $(\pi, 0)$ (o)  $(\pi, \frac{\pi}{2})$ (p)  $(\pi, \frac{3\pi}{2})$ (q)  $(\pi, \pi)$ 

**Figura 47:** Espectros ópticos do sistema AM-PM com os moduladores QPSK em suas 16 possíveis combinações de fase. (a), (d), (f), (g), (j), (l), (n) e (q) representam bases compatíveis e (b), (c), (e), (h), (i), (m), (o) e (p) representam bases incompatíveis.

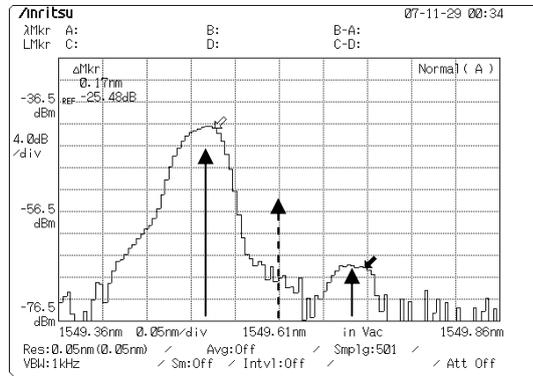
Nas quatro primeiras figuras, são mostradas as posições espectrais da portadora óptica e de suas bandas laterais. Podem-se observar os casos em que há compatibilidade entre a base de preparação do qubit por Alice e a base de medição escolhida por Bob, refletindo-se na supressão de uma das bandas laterais, como nas figuras (a), (d), (f), (g), (j), (l), (n) e (q). Nos demais casos, vêem-se que as bandas laterais apresentam amplitudes idênticas, caracterizando indeterminação do bit transmitido. Escolheu-se os estados 0 e  $\pi/2$  para representarem as bases de decodificação de Bob.

Na figura 48 são vistos os espectros do sistema AM-PM com supressão de portadora por um (coluna esquerda) e por dois (coluna direita) FFP para três possíveis combinações de fase: duas com bases compatíveis e uma com bases incompatíveis.

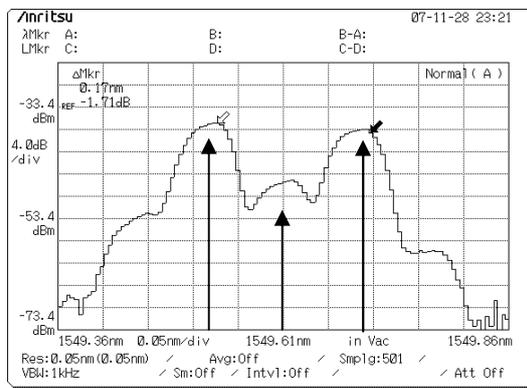
Observa-se, apesar da baixa resolução do OSA, a supressão extra de portadora obtida pela adição do segundo filtro de Fabry-Perot.



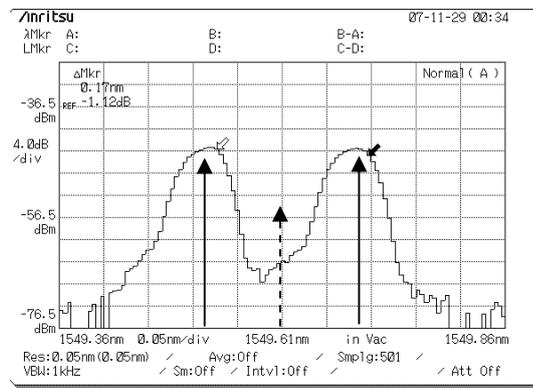
(a)  $FFP_1 - (0,0)$



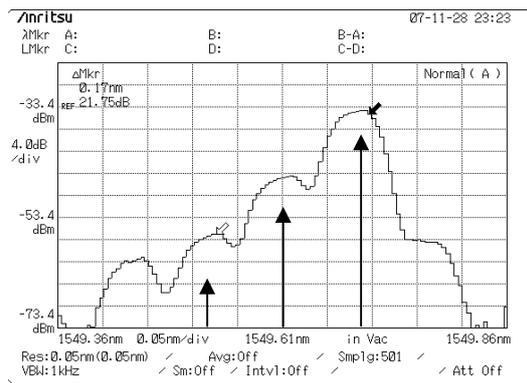
(d)  $FFP_1/FFP_2 - (0,0)$



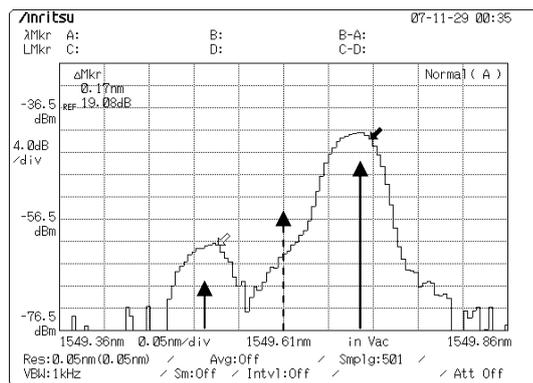
(b)  $FFP_1 - \left(0, \frac{\pi}{2}\right)$



(e)  $FFP_1/FFP_2 - \left(0, \frac{\pi}{2}\right)$



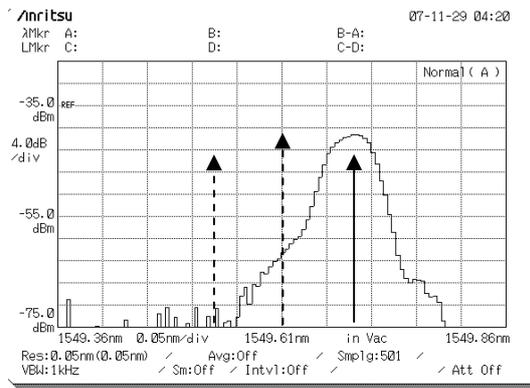
(c)  $FFP_1 - (\pi,0)$



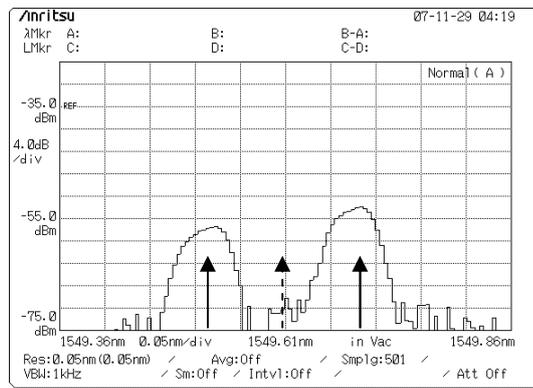
(f)  $FFP_1/FFP_2 - (\pi,0)$

**Figura 48:** Comparativo da supressão de portadora obtida com apenas um FFP (a, b, c) e com dois FFP em série (d, e, f).

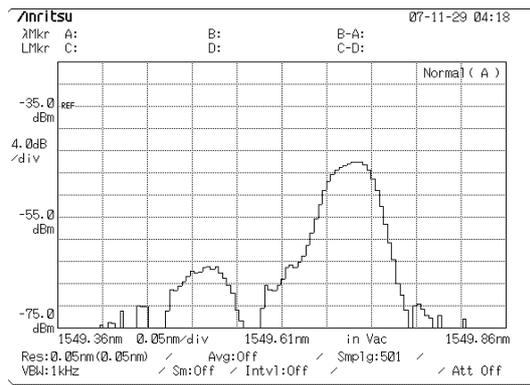
Finalmente, na figura 49 são vistos os espectros de saída do sistema após a separação espectral pelo IMZ, para as diversas combinações de fase de Alice e Bob. A coluna da esquerda mostra a saída  $S_A$  do IMZ, enquanto a coluna da direita mostra sua saída  $S_B$ .



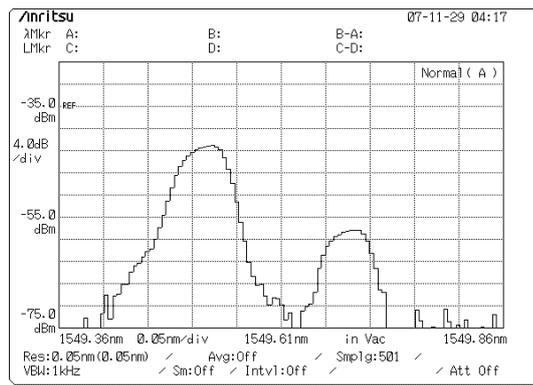
(a)  $S_A - (0,0)$



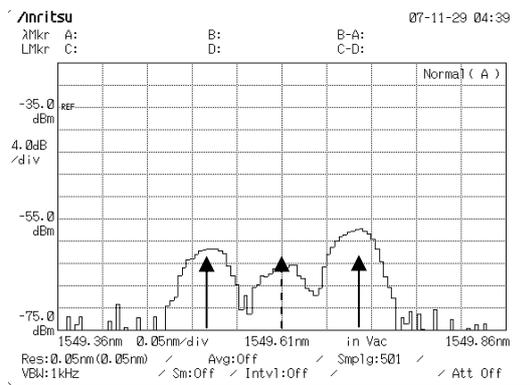
(i)  $S_B - (0,0)$



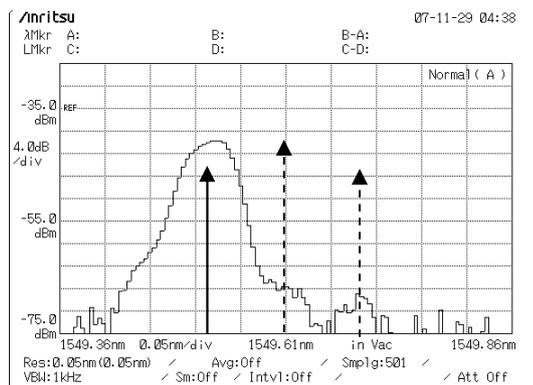
(b)  $S_A - \left(0, \frac{\pi}{2}\right)$



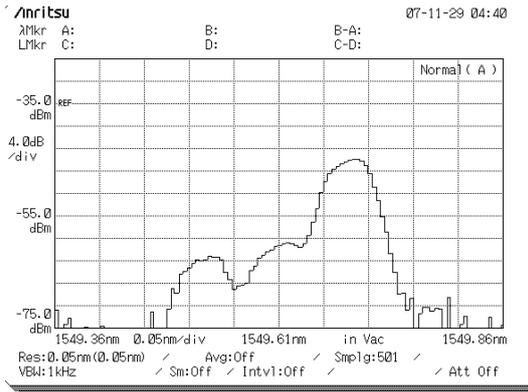
(j)  $S_B - \left(0, \frac{\pi}{2}\right)$



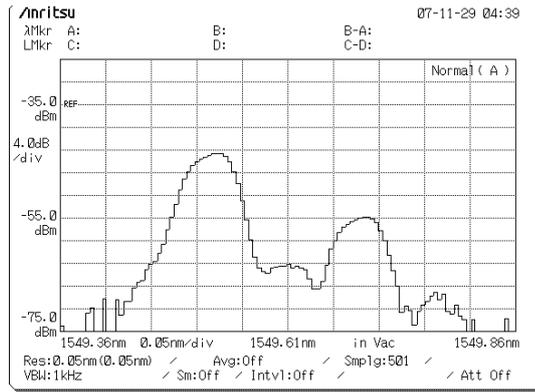
(c)  $S_A - (\pi,0)$



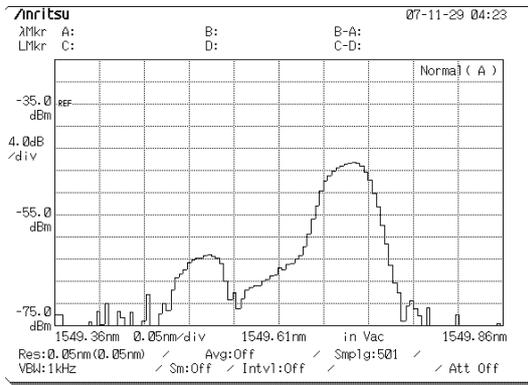
(l)  $S_B - (\pi,0)$



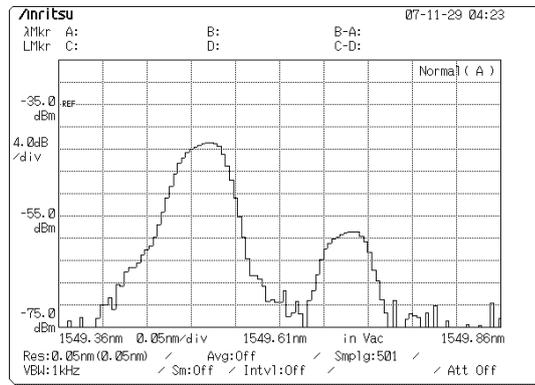
$$(d) S_A - \left( \pi, \frac{\pi}{2} \right)$$



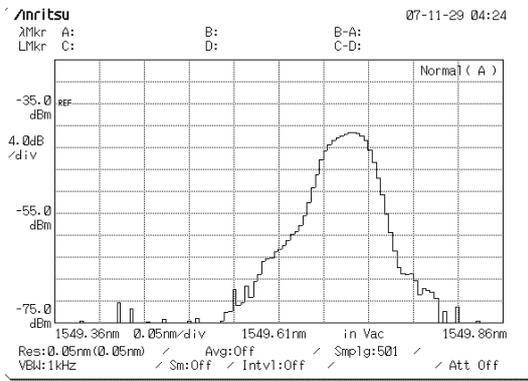
$$(m) S_B - \left( \pi, \frac{\pi}{2} \right)$$



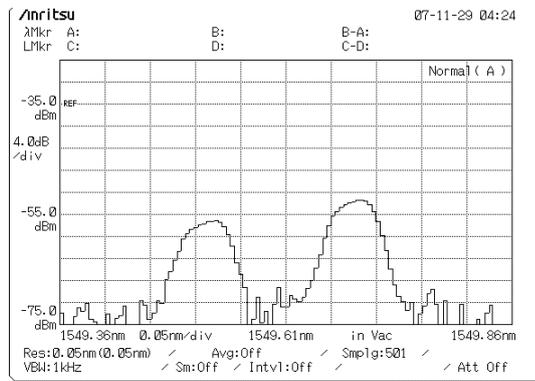
$$(e) S_A - \left( \frac{\pi}{2}, 0 \right)$$



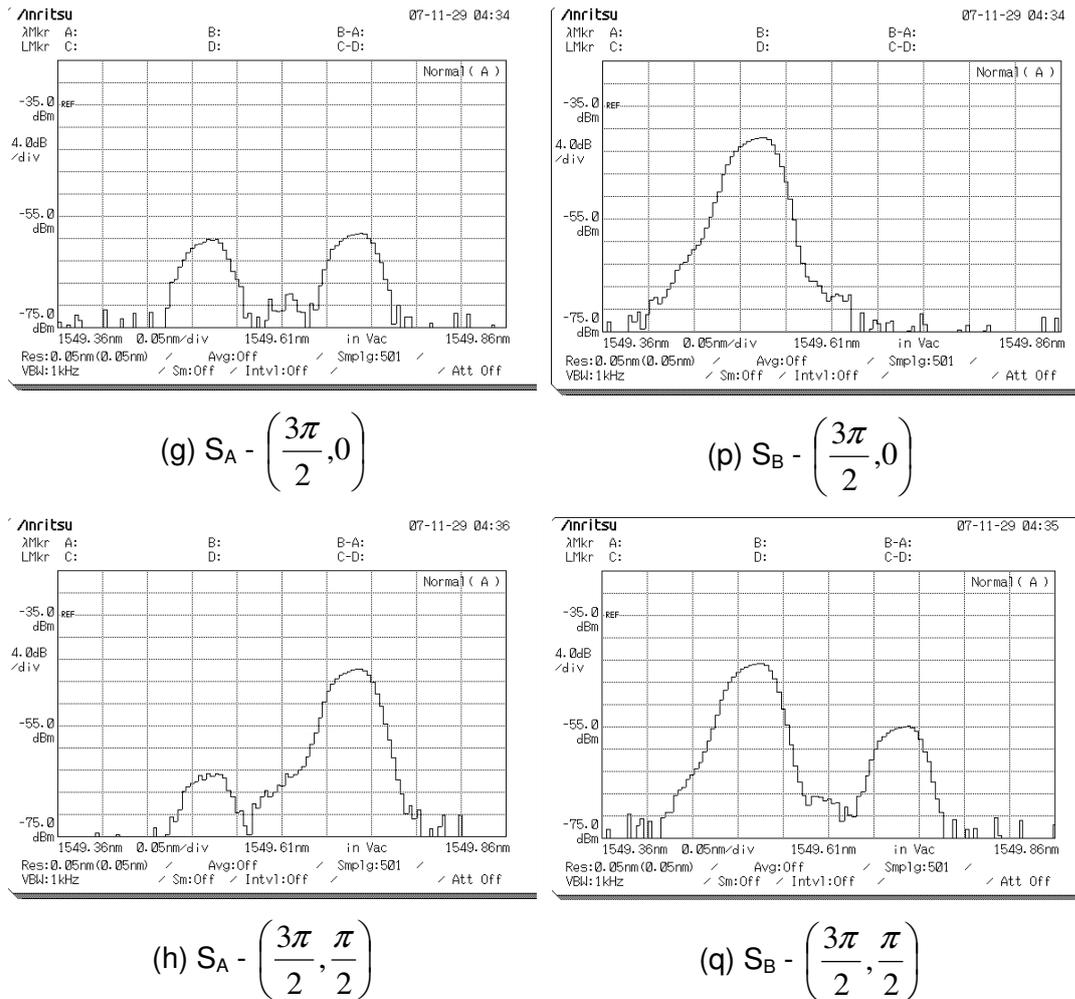
$$(n) S_B - \left( \frac{\pi}{2}, 0 \right)$$



$$(f) S_A - \left( \frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right)$$



$$(o) S_B - \left( \frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right)$$

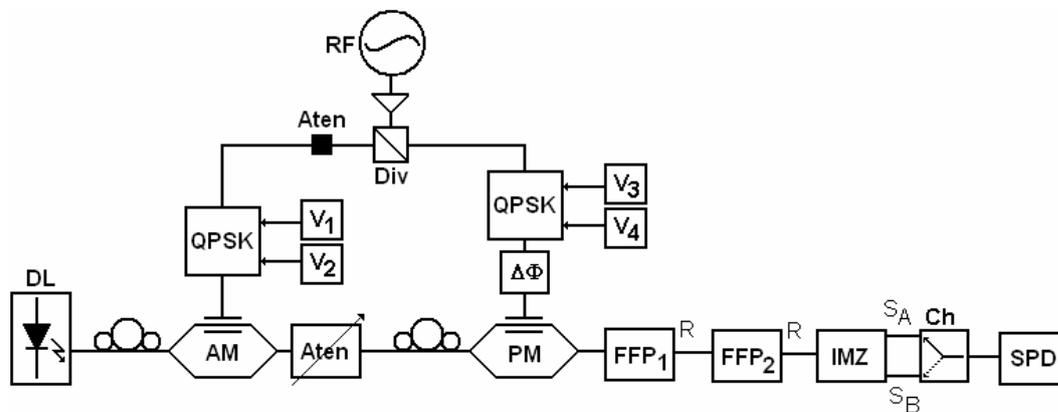


**Figura 49:** Espectros ópticos nas saídas  $S_A$  (a até h) e  $S_B$  (i até q) do sistema AM-PM com dois FFP e IMZ para as possíveis combinações de fase dos moduladores QPSK.

Nota-se que a potência óptica se apresenta idêntica nas duas portas de saída do sistema nos casos em que as bases de Alice e Bob divergem, ou seja, casos (b,j), (d,m), (e,n) e (h,q). Por outro lado, percebe-se a seleção de uma das bandas laterais em uma das portas quando há escolha correta de bases (demais pares de figuras). Nestes casos, a potência óptica emergente da porta complementar atuará como ruído de fundo no sistema, contribuindo para os casos de indeterminação em que ambos os detectores de fótons únicos disparam.

### 6.2.2. Medições quânticas

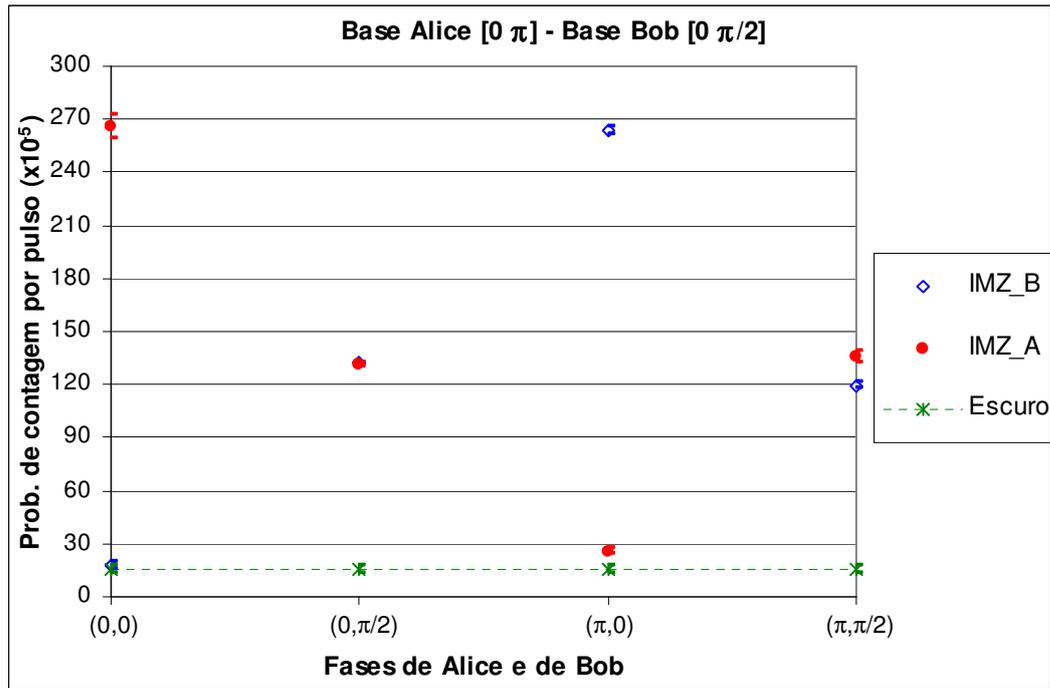
As medições quânticas com QPSK se assemelham às medições quânticas anteriores, a menos da excursão em frequência. Esta foi mantida fixa em 10,308MHz, variando-se as fases dos moduladores QPSK de acordo com as possibilidades de combinações de bits e bases escolhidas por Alice e por Bob. Na transmissão foram ajustadas as quatro possíveis fases, enquanto que, na recepção, variou-se dentre as fases 0 e  $\pi/2$ , uma de cada base de medição, gerando gráficos de contagem. As configurações do detector foram mantidas. O diagrama de blocos da configuração pode ser visto na figura 50.



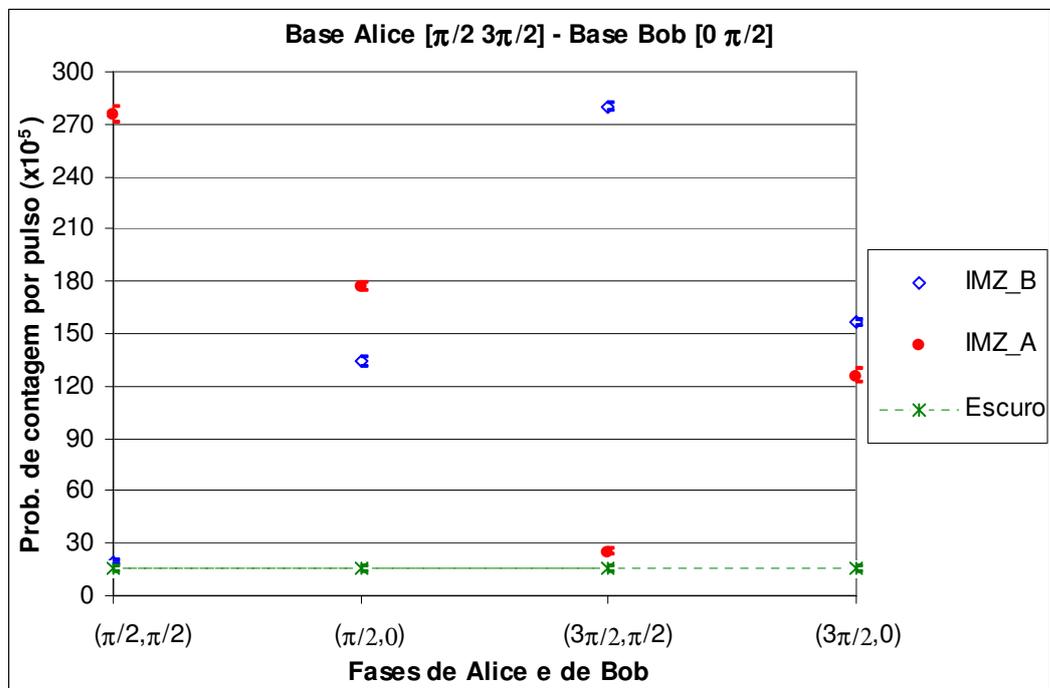
**Figura 50:** Montagem experimental para medições no regime quântico com os moduladores QPSK.

#### 6.2.2.1. Resultados

As contagens quânticas foram divididas em dois gráficos, agrupados segundo as bases escolhidas por Alice. Na figura 51, Alice pôde escolher as fases 0 ou  $\pi$ , enquanto Bob optou pela medição na base correta, escolhendo fase 0, ou na base errada, escolhendo fase  $\pi/2$ . Na figura 52, Alice escolheu dentre as fases  $\pi/2$  e  $3\pi/2$ , enquanto Bob manteve suas escolhas dentre 0 e  $\pi/2$ . São mostradas as contagens (média e desvio-padrão) obtidas às duas saída do IMZ, com três medições durante um tempo de aquisição de 10s cada com taxa de 100kHz.



**Figura 51:** Contagem para as combinações de fase entre Alice (0 ou  $\pi$ ) e Bob (0 ou  $\pi/2$ ) do sistema com os moduladores, para cada saída do IMZ.. Losangos vazios: saída B; círculos cheios: saída A; linha tracejada: escuro.



**Figura 52:** Contagem para as combinações de fase entre Alice ( $\pi/2$  ou  $3\pi/2$ ) e Bob (0 ou  $\pi/2$ ) do sistema com os moduladores, para cada saída do IMZ. Losangos vazios: saída B; círculos cheios: saída A; linha tracejada: escuro.

A visibilidade e as taxas de erros de qubits total ( $QBER_{total}$ ), devida aos dispositivos sistêmicos ( $QBER_{disp}$ ) e devida ao detector ( $QBER_{det}$ ) medidas são apresentadas na tabela 7, assim como os valores obtidos considerando-se a utilização de um SPAD com menor contagem de escuro (uma ordem de grandeza inferior).

Saída	$V_{medida}$	$QBER_{total}$	$QBER_{det}$	$QBER_{disp}$	$V_{SPAD_{melhor}}$	$QBER_{total}$	$QBER_{det}$	$QBER_{disp}$
A	83,0%	8,5%	4,3%	4,2%	90,6%	4,7%	0,5%	4,2%
	82,7%	8,6%	4,4%	4,2%	90,6%	4,7%	0,5%	4,2%
B	88,0%	6,0%	4,6%	1,4%	96,2%	1,9%	0,5%	1,4%
	86,4%	6,8%	4,8%	2,0%	94,9%	2,6%	0,5%	2,0%

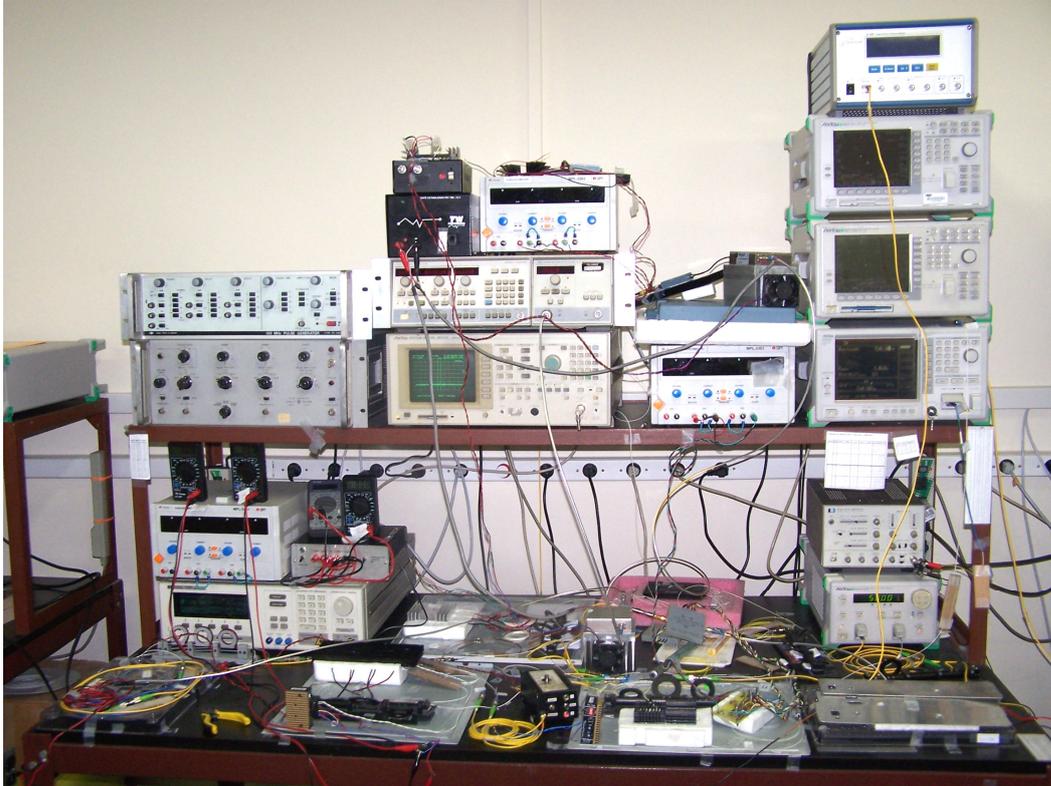
**Tabela 7:** Visibilidade das duas saídas do sistema com chaveamento de fase medida e estimada para o caso da utilização de um SPAD com ruído de escuro uma ordem de grandeza inferior, bem como valores da QBER total,  $QBER_{disp}$  devida aos dispositivos sistêmicos e  $QBER_{det}$  devida ao detector, para ambos os casos.

Observa-se pelas medições que a  $QBER_{det}$  apresenta-se excessivamente alta. Logo, este valor foi corrigido assumindo-se uma menor contagem de escuro por parte do detector de fótons únicos. Neste caso, a taxa de erros de qubits passa a ser dominada pelos dispositivos ópticos envolvidos. Todavia, a QBER total mostra-se tolerável, já que os valores entre 6,0 e 8,6% encontram-se abaixo do limite de 12,4%, adotado como limiar para que haja comunicação segura mediante amplificação de privacidade [41], podendo ser melhoradas para 1,9 a 4,7%.

### 6.3. Medições com enlace de sincronismo

O último grupo de medições foi executado incluindo-se o enlace de sincronismo, através do MUX e do DEMUX, além da escolha discreta das fases de RF (com frequência fixa) por Alice e Bob através do modulador QPSK. Dessa forma, não há mais o compartilhamento do gerador de RF, o que distanciava o experimento de uma aplicação real. O sinal de RF idêntico ao utilizado por Alice é enviado por multiplexação por divisão no comprimento de onda para Bob através da fibra. As medidas foram obtidas de modo semelhante ao anterior.

Na figura 53 é apresentada uma fotografia da montagem experimental final na bancada de trabalho.



**Figura 53:** Fotografia da montagem experimental completa sobre a bancada de trabalho.

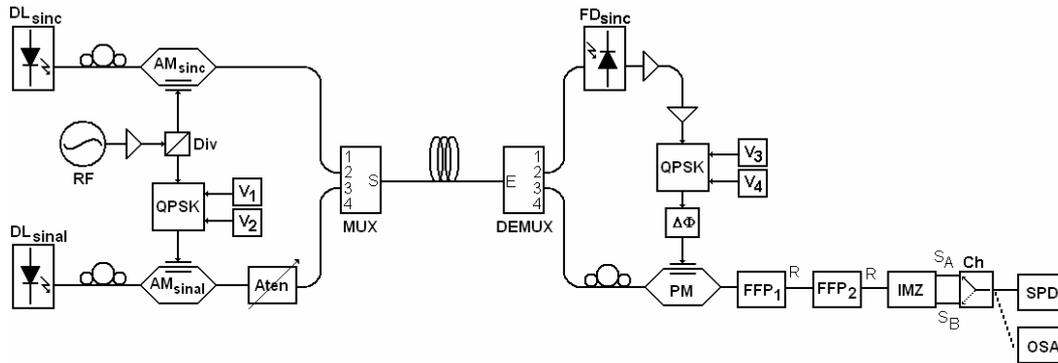
### 6.3.1. Medições clássicas

O sistema completo, incluindo o canal de sincronismo, é mostrado na figura 54. O laser de sincronismo ( $DL_{\text{sinc}}$ ), com comprimento de onda diferente do canal quântico, foi modulado em amplitude por parte do sinal de RF e transmitido para Bob, assim como o sinal quântico, após multiplexação em comprimento de onda.

Na recepção, depois de demultiplexado e recuperado pelo fotodetector clássico, o sinal elétrico de sincronismo é amplificado e reutilizado. Os amplificadores de RF da recepção foram escolhidos e dispostos de forma a minimizar o alargamento espectral do sinal óptico modulado, devido à suas

figuras de ruído, além de prover potência idêntica à do sistema anterior para o modulador de fase.

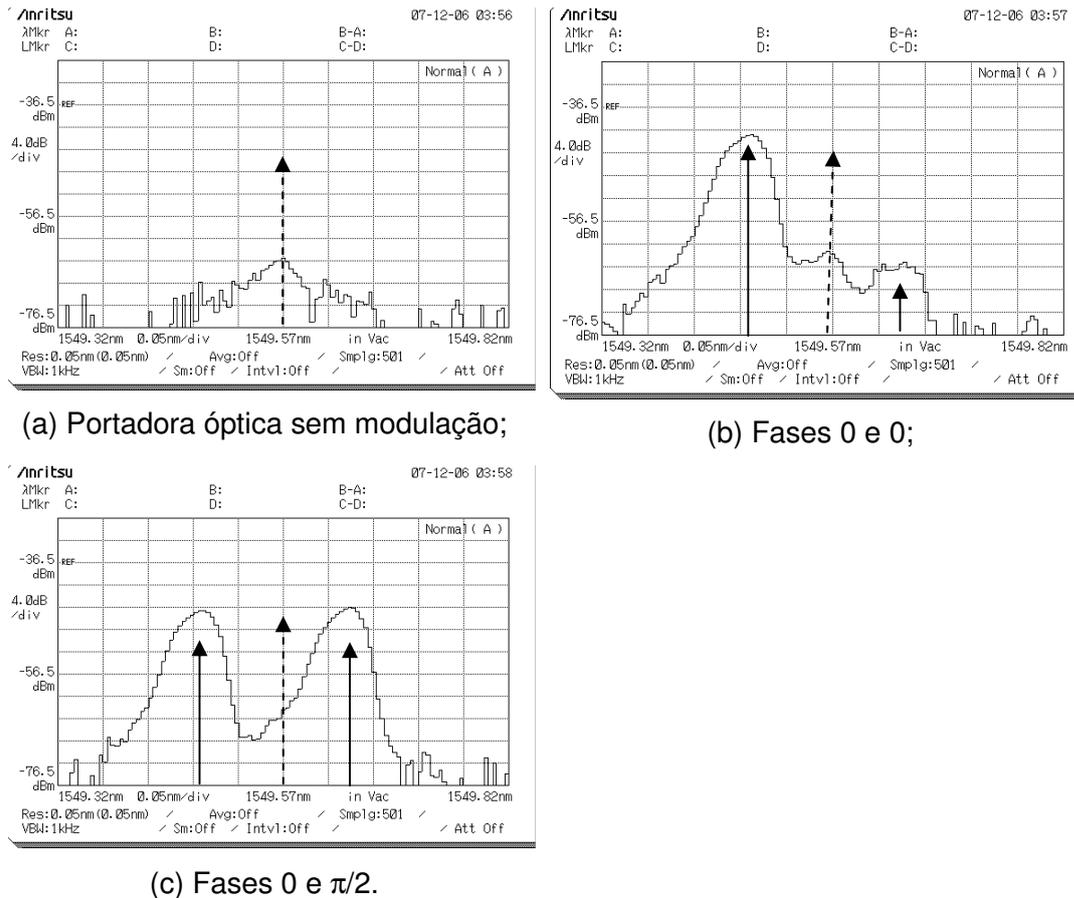
Para o caso clássico não é utilizado o atenuador (Aten) e, ao final, conecta-se o OSA.



**Figura 54:** Diagrama de blocos do sistema completo com sincronismo por WDM.

### 6.3.1.1. Resultados

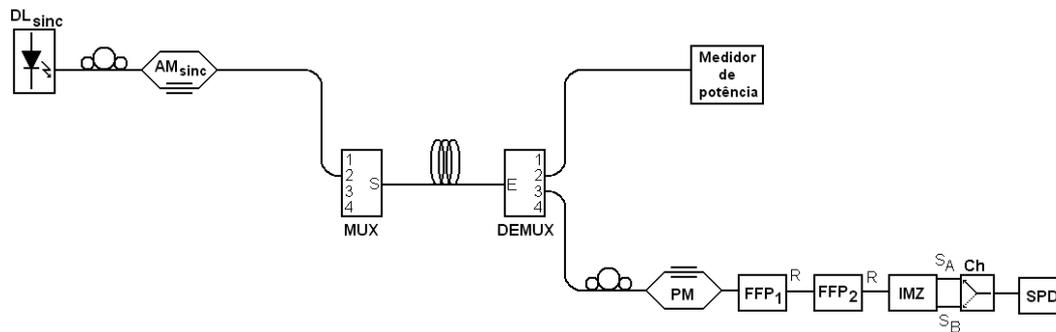
Na figura 55 são mostrados espectros obtidos da portadora óptica sem modulação à saída do segundo filtro de Fabry-Perot, apresentando-se ligeiramente alargada. Vêem-se também a seleção da banda lateral esquerda, com a combinação de fase 0 e 0, e a ambigüidade de bandas laterais, com fases 0 e  $\pi/2$ .



**Figura 55:** Espectros ópticos do sistema com sincronismo por WDM. Pode-se observar (a) o alargamento espectral do sinal de RF a ser utilizado por Bob devido ao ruído de seus amplificadores de RF. Também se vêem a saída dos FFP para os casos de (b) medição na base correta e (c) na base errada.

### 6.3.2. Medições quânticas

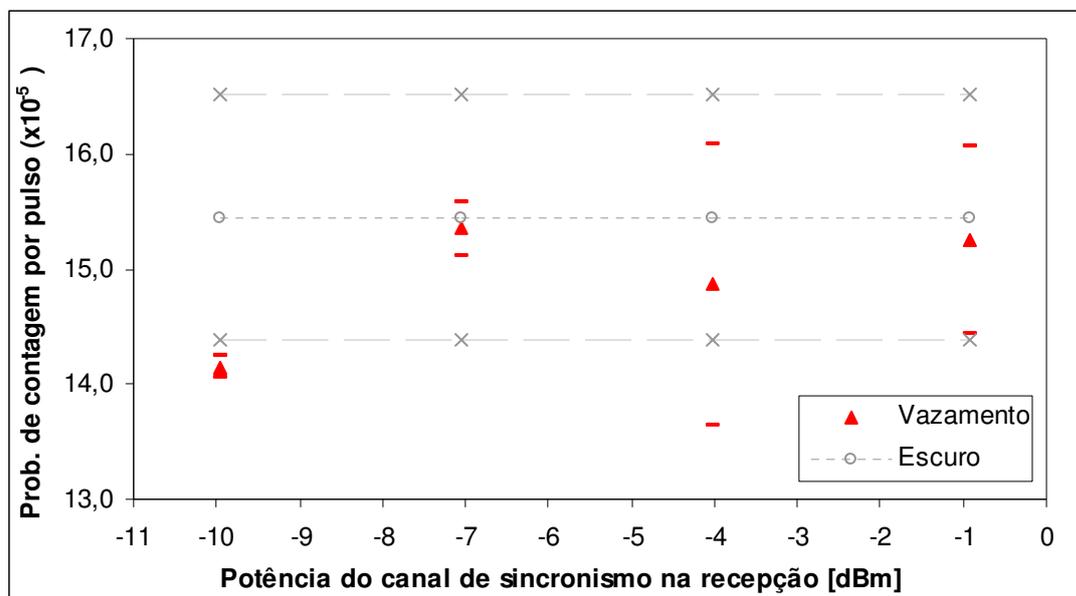
Para se verificar uma possível interferência entre o canal de sincronismo e o canal quântico, foram realizadas medidas com a configuração da figura 56. Com o laser do canal quântico desligado, foi variada a potência lançada no sistema pelo laser de sincronismo, medindo-se seu valor na recepção, até se obter valor próximo de 0dBm (limite da fonte laser utilizada). Para cada valor de potência óptica foram feitas contagens no canal quântico, assim como foram feitas contagens com o laser de sincronismo desligado (contagens de escuro), tomadas como referência. Para as contagens, semelhantes às da seção 6.2.2.1, utilizou-se a configuração da figura 54 com o SPD conectado ao fim do sistema.



**Figura 56:** Configuração para a verificação de interferência co-canal entre o canal de sincronismo e o quântico.

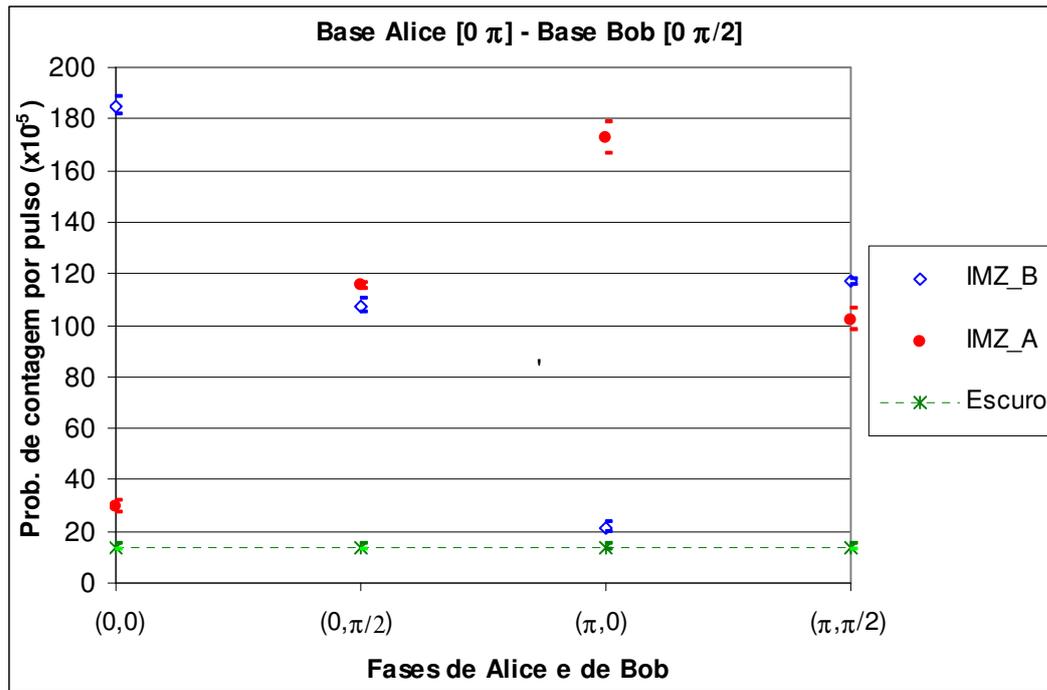
### 6.3.2.1. Resultados

A figura 57 apresenta o resultado do teste de vazamento de sinal do canal de sincronismo para o canal quântico. Verifica-se que as medidas (triângulos) ficaram dentro do desvio-padrão de ruído do SPAD, dado pelas linhas tracejadas. As contagens referem-se a pulsos de gatilho de 2,5ns de duração.



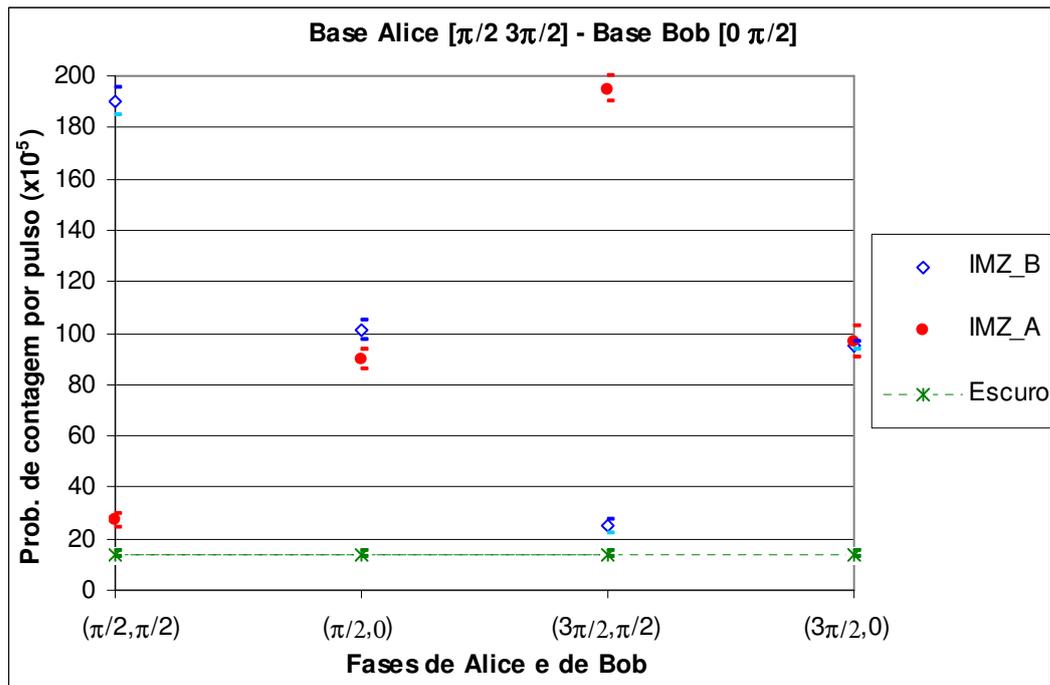
**Figura 57:** Medição da interferência do sinal de sincronismo em relação ao canal quântico para diferentes valores de potência (triângulo) e contagens de escuro (linhas tracejadas).

Na figura 58 são mostradas as contagens para os casos em que Alice escolhe entre as fases 0 e  $\pi/2$ , enquanto Bob escolhe entre 0 e  $\pi$ . São mostradas as contagens (média e desvio-padrão) obtidas às duas saídas do IMZ, com três medições durante um tempo de aquisição de 10s cada com taxa de 100kHz.



**Figura 58:** Contagem para as combinações de fase entre Alice (0 ou  $\pi$ ) e Bob (0 ou  $\pi/2$ ) do sistema com os moduladores QPSK e com o canal de sincronismo, para cada saída do IMZ. Losangos vazios: saída B; círculos cheios: saída A; linha tracejada: escuro.

Na figura 59 são vistas as saídas do IMZ para os casos em que Alice escolhe entre as fases  $\pi/2$  ou  $3\pi/2$  e Bob escolhe entre as fases 0 ou  $\pi/2$ .



**Figura 59:** Contagem para as combinações de fase entre Alice ( $\pi/2$  ou  $3\pi/2$ ) e Bob ( $0$  ou  $\pi/2$ ) do sistema com os moduladores QPSK e com o canal de sincronismo, para cada saída do IMZ. Losangos vazios: saída B; círculos cheios: saída A; linha tracejada: escuro.

A visibilidade e as taxas de erros de qubits total ( $QBER_{total}$ ), devido aos dispositivos sistêmicos ( $QBER_{disp}$ ) e devido ao detector ( $QBER_{det}$ ) medidas são apresentadas na tabela 8, assim como os valores obtidos considerando-se a utilização de um SPAD com menor contagem de escuro (uma ordem de grandeza inferior).

Saída	V	$QBER_{total}$	$QBER_{det}$	$QBER_{disp}$	$V_{SPAD\ melhor}$	$QBER_{total}$	$QBER_{det}$	$QBER_{disp}$
A	73,6%	13,2%	5,2%	8,0%	82,9%	8,6%	0,6%	8,0%
	73,0%	13,5%	5,9%	7,6%	83,5%	8,2%	0,7%	7,6%
B	80,1%	10,0%	6,1%	3,8%	91,0%	4,5%	0,7%	3,8%
	76,7%	11,6%	5,7%	5,9%	86,9%	6,5%	0,7%	5,9%

**Tabela 8:** Visibilidade das duas saídas do sistema com enlace de sincronismo medida e estimada para o caso da utilização de um SPAD com ruído de escuro uma ordem de grandeza inferior, bem como valores da  $QBER_{total}$ ,  $QBER_{disp}$  devida aos dispositivos sistêmicos e  $QBER_{det}$  devida ao detector, para ambos os casos.

A QBER obtida, apesar de maior que nas medidas da seção 6.2.2.1, mantém-se, ainda, no limite tolerável. Seu aumento foi ocasionado pelo alargamento espectral do sinal na modulação PM devido ao ruído introduzido pelos amplificadores da seção de RF de Bob, apesar da escolha, dentre os dispositivos disponíveis, dos que minimizaram o problema. O alargamento espectral impossibilita uma filtragem eficiente, elevando o nível de ruído, além de dificultar a separação espectral, reduzindo a contagem.

Além disso, o orçamento de potência para a modulação em Alice e em Bob ficou ligeiramente deficiente, ou seja, ao se enviar o sinal de RF para Bob por WDM através do canal de sincronismo, não houve a restauração eficiente da potência ótima para que fossem reproduzidas as condições do sistema anterior de forma fidedigna, o que resultou em prejuízo nas taxas de contagem.

Mesmo com os problemas relatados, vê-se que, utilizando um bom detector de fótons únicos, o sistema apresenta QBER total entre 4,5 e 8,2%, valores inferiores a 12,4%, adotado como limite superior para que haja comunicação segura mediante amplificação de privacidade [41].