

4

Montagem Experimental

Nesse momento, o protótipo do novo polarímetro já se encontra consolidado na teoria. Esse capítulo tem como finalidade, portanto, descrever o processo de montagem realizado para a construção do protótipo e, em seguida, apresentar os resultados obtidos.

A ordem de apresentação das etapas de montagem do polarímetro tentará, ao máximo, ser fiel à ordem cronológica real que ocorreu no laboratório. Alguns passos referentes à criação do software utilizado para rodar o algoritmo do polarímetro serão omitidos.

4.1

Material Utilizado

O diagrama de blocos do modelo de polarímetro desenvolvido, mostrado na figura 10, ilustra apenas uma parte dos componentes necessários para a montagem e verificação do protótipo. A seguir, se encontra uma relação de todos os componentes utilizados em todas as etapas da montagem, e uma breve descrição de cada um deles sempre que for necessário.

- Fonte Laser: um laser semiconductor de 1310 nm, utilizado como fonte de luz polarizada. O bloco do Laser nas figuras a seguir representa também o seu driver e seu controlador de temperatura.
- Controlador de Polarização: um dispositivo mecânico utilizado para gerar uma birrefringência qualquer à escolha.
- Beamsplitter: utilizado para dividir a luz em duas componentes de iguais intensidade e polarização.
- Lâminas piezoelétricas: consistem em pequenas superfícies planas sobrepostas entre as quais passa um pedaço de fibra. O ângulo (0 ou 45°) refere-se à inclinação do plano das placas com relação à horizontal. Em cada uma delas existe um atuador piezoelétrico que causa uma deformação física na fibra à medida que lhe fornecemos tensão elétrica.

- Polarizador: um dispositivo polarizador isolador, que só permite a passagem de luz em uma dada polarização linear desconhecida.
- Fotodetector: utilizado para medir a intensidade da luz incidente.
- Gerador de Sinais: utilizado para gerar uma forma de onda de tensão senoidal, utilizada em etapas iniciais de montagem.
- Osciloscópio: utilizado em alguns momentos para visualizar a forma de onda no fotodetector.
- Microcomputador: necessário para, a partir das intensidades lidas, calcular os parâmetros de Stokes e, além disso, escrever as tensões necessárias nos atuadores piezoelétricos.
- Polarímetro de Referência: um polarímetro comercialmente disponível, utilizado no processo de calibração.
- Outros: conectores, rabichos de fibra, etc.

Todas as medidas iniciais foram realizadas com luz polarizada (do Laser). As medidas de luz parcialmente polarizada utilizaram uma montagem um pouco diferente, que será explicada posteriormente na seção 4.6.

4.2

O Alinhamento do Polarizador

O teorema enunciado e demonstrado na seção 3.2.2 nos diz que, para garantia do funcionamento do polarímetro, é necessário alinhar o polarizador à primeira lâmina, representada por L_1 na figura 10. Providenciar esse alinhamento, na teoria, é muito simples: basta escolher um polarizador linear 0° . Na prática, no entanto, isso não é tão simples. Em geral, não sabemos a direção do eixo de um polarizador/isolador; é possível saber, por exemplo, que ele é linear, ou seja, possui auto-estados lineares, mas não sabemos se esses auto-estados são necessariamente nas direções x e y como desejado.

Uma das formas de resolver esse problema é utilizando um controlador de polarização em série com o polarizador. Assim, o controlador poderia ser ajustado de forma que, em sua entrada, fosse enxergado um polarizador linear 0° , ou seja, o controlador introduziria uma transformação de polarização de forma

que uma polarização linear 0° em sua entrada chegue ao polarizador alinhada a seu eixo, seja quem ele for.

Ironicamente, essa solução leva a outro problema: ajustar o controlador de polarização. Uma das formas de realizar esse ajuste utiliza a montagem ilustrada na figura 13, abaixo.

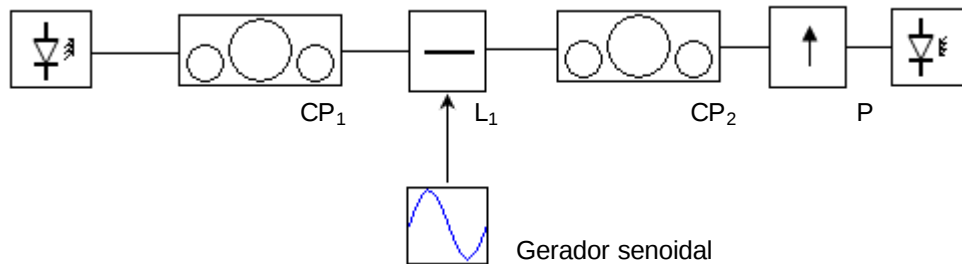


Figura 1: Montagem para alinhamento do polarizador P com a lâmina L_1

O esquema da figura 13 pode ser explicado da seguinte forma: os dois primeiros blocos, o laser e o controlador de polarização CP_1 , são utilizados para gerar estados de polarização arbitrários na entrada do terceiro bloco, a lâmina birrefringente linear 0° L_1 . A figura mostra um gerador de sinais senoidais conectado ao atuador piezoelétrico da lâmina, de forma que a birrefringência por ela gerada varie com o tempo de forma periódica. O segundo controlador de polarização CP_2 , o qual desejamos ajustar, tem como objetivo transformar a polarização linear 0° em outra polarização que coincida com o eixo de transmissão de P .

Observe que, no caso de uma configuração genérica de CP_2 , a intensidade lida pelo fotodetector irá variar com o tempo, pois a variação senoidal da birrefringência de L_1 implica em uma variação senoidal do ângulo formado entre o estado de polarização na entrada de P com seu eixo de transmissão. Isso quer dizer que a tensão ou corrente na saída do fotodetector possuirá uma componente DC e uma componente AC.

Entretanto, se CP_2 estiver configurado de forma que L_1 enxergue à sua direita um polarizador linear 0° , a intensidade no fotodetector não irá variar. Para entender essa afirmação, observe novamente a figura 11. Note que a atuação de L_1 , individualmente, só é capaz de causar rotações na esfera de Poincaré segundo os círculos azuis. Se, e somente se, o eixo do polarizador estiver alinhado com o eixo S_1 , esses círculos azuis corresponderão a *regiões de intensidade constante*,

isto é, todos os pontos desses círculos formam o mesmo ângulo com o eixo do polarizador. Ou seja: nessa condição de alinhamento, a intensidade lida pelo fotodetector não será alterada por uma rotação no estado de polarização de entrada em torno do eixo S_I .

O mecanismo de alinhamento consiste em, portanto, descobrir uma configuração de CP_2 para o qual a intensidade no fotodetector é constante, não importa qual seja a configuração de CP_1 . Para isso, ligamos o fotodetector a um osciloscópio e observamos a forma de onda para várias configurações de CP_1 . Assim, buscamos variar CP_2 de forma que a componente AC do sinal (provocada pelo gerador senoidal) seja a menor possível. O alinhamento é obtido quando essa componente AC estiver anulada para todas as configurações de CP_1 .

É importante ressaltar que existem duas configurações de CP_2 que resultam em uma componente AC nula, uma para cada auto-estado do polarizador P. Portanto, o objetivo do procedimento é buscar a configuração que anule a componente AC mas que mantenha a componente DC diferente de zero¹⁰.

4.3 O Processo de Calibração

A forma mais fácil de saber se um protótipo de polarímetro está funcionando ou não consiste em comparar suas medidas com as de um outro polarímetro no qual confiamos. Portanto, os processos subsequentes têm como objetivo fazer com o que o protótipo desenvolvido apresente resultados idênticos aos de um polarímetro de referência. Está sendo assumido que o polarímetro de referência está perfeitamente calibrado, mesmo que isso não seja verdade.

Existe um grande problema prático, no entanto, no que diz respeito a usar um polarímetro de referência. Imagine que uma fonte de luz está ligada a um polarímetro por meio de um cabo de fibra óptica, e que nesse momento desejamos ligar essa mesma fonte em um outro polarímetro para comparar os resultados. Para isso, seria necessário desconectar o cabo do primeiro polarímetro e conectá-lo ao segundo. A pergunta que surge é: o estado de polarização na entrada dos dois polarímetros é o mesmo?

¹⁰ Se CP_2 levar a polarização linear 0° ao eixo do polarizador que corresponde ao autovalor zero, a intensidade será sempre zero, ou seja, a componente DC também será nula.

Infelizmente, alguém poderia afirmar com uma grande probabilidade que não, os estados não são os mesmos. Polarização da luz de um Laser é algo que pode mudar absurdamente com pouco esforço. Basta, por exemplo, afrouxar um pouquinho o conector ligado ao polarímetro, ou alterar a disposição física do cabo de fibra óptica (por exemplo, entortá-lo um pouco). Em outras palavras, existe uma grande sensibilidade do estado de polarização quanto às conexões e disposições físicas dos componentes. Isso inviabiliza um método de comparação do tipo mencionado acima.

É necessário, portanto, utilizar um método de comparação simultânea. Isso pode ser obtido através do uso de um beamsplitter, desde que as duas saídas se comportem de formas extremamente semelhantes (mesmo comprimento, ângulo, etc). Por enquanto, consideraremos que o beamsplitter é ideal, ou seja, não introduz transformações de polarização no sinal luminoso. A figura 14 ilustra o uso de um beamsplitter no processo de calibração.

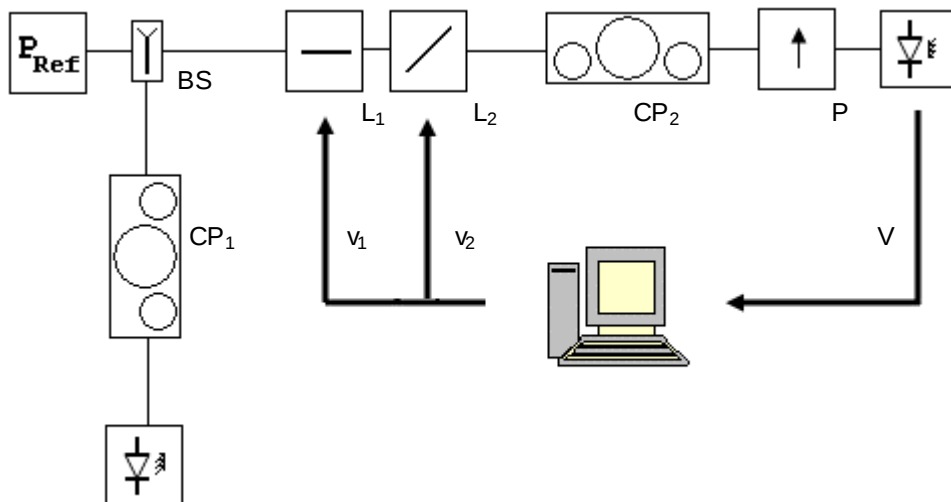


Figura 2: Processo de calibração do polarímetro

Nesse esquema, a luz proveniente do Laser é dividida em duas componentes de mesma intensidade e mesmo estado de polarização (definido por CP_1) pelo beamsplitter. Uma das componentes é conectada ao polarímetro de referência, enquanto a outra é conectada ao protótipo. Note que o braço direito do esquema da figura 14 é, em essência, o diagrama de blocos mostrado na figura 10.

Todo o problema da calibração pode ser resumido em encontrar pares de tensões (v_1, v_2) que, aplicados aos atuadores piezoelétricos das lâminas L_1 e L_2 , gerem as birrefringências necessárias para simular polarizadores nas direções de interesse para a determinação dos parâmetros de Stokes. Essas direções são: linear 0° (ou linear x), linear 90° (ou linear y), linear 45° , linear 135° , circular à direita e circular à esquerda.

As seções abaixo tratam de cada etapa individual do processo, desde a criação de um software para a leitura e escrita de dados até as etapas finais de refinamento da escolha das tensões.

4.3.1

Ajuste de Parâmetros da Placa A/D e D/A

Através do esquema ilustrado na figura 14 é possível perceber que um computador é utilizado para escrever as tensões nos atuadores piezoelétricos e para ler a tensão no fotodetector. Por conseguinte, é preciso utilizar uma placa com canais A/D e D/A e, além disso, desenvolver um programa de computador que realize essas tarefas.

O programa desenvolvido utilizou o ambiente de programação LabView, que permite de forma simples uma comunicação eficiente entre o software e a placa de aquisição de dados. Como o polarímetro possui apenas um fotodetector, foi necessária a utilização de só um canal A/D; por outro lado, como são dois atuadores piezoelétricos, foram utilizados dois canais D/A. Tanto os canais A/D quando os D/A foram programados para ler/escrever tensões de 0V a 10V.

Essa escolha da faixa de tensões possui duas reflexões imediatas. A primeira delas, quanto ao canal A/D, se refere ao ganho do fotodetector. Para obter-se a melhor resolução possível, o fotodetector foi configurado de forma a fornecer um ganho alto o suficiente para diminuir a imprecisão da leitura mas baixo o suficiente para não atingir a saturação. A segunda consequência se refere à pré-tensão necessária nas lâminas; como o ganho do driver dos atuadores é de aproximadamente 10, isso significa que tensões de 0 a 100V poderão ser aplicadas nos dispositivos piezoelétricos. Portanto, uma pré-tensão mecânica foi aplicada às lâminas para que uma variação de 100V nos atuadores implique em uma

birrefringência suficiente para causar uma rotação de pelo menos uma volta na esfera de Poincaré.

Além disso, a placa de aquisição de dados utilizada possuía 12 bits de resolução, o que nos fornece 4096 níveis de quantização. Dado que o fotodetector utilizado satura com uma saída de 4V, apenas 40% dos níveis de quantização estão efetivamente sendo utilizados, ou seja, cerca de 1600. Por esta razão, a maior precisão possível dessa configuração seria da ordem de 0,06%. É claro que esse nível de precisão jamais será atingido devido à presença de ruído.

4.3.2

Leitura e Escrita de Dados

O processo mais simples realizado pelo computador é o de aquisição (leitura) de dados. Com uma periodicidade pré-estabelecida, o sinal elétrico na entrada da porta A/D é amostrado e armazenado. Como o processo completo de calibração depende da leitura de 6 diferentes intensidades, o ciclo de aquisição de dados ocorre de 6 em 6 períodos de amostragem¹¹.

Para se determinar os parâmetros de Stokes normalizados não é necessário o conhecimento das intensidades em (3.1); o conhecimento de razões entre cada uma e I_0 é suficiente. Portanto, a responsividade do fotodetector pode ser ignorada e os parâmetros de Stokes podem ser escritos como uma razão de tensões elétricas:

$$\begin{aligned}
 s_0 &= 1 \\
 s_1 &= \frac{V_x - V_y}{V_x + V_y} \\
 s_2 &= \frac{V_{45^\circ} - V_{135^\circ}}{V_{45^\circ} + V_{135^\circ}} \\
 s_3 &= \frac{V_E - V_D}{V_D + V_E}
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

Nessa representação, todos os termos dos denominadores são iguais e possuem um valor correspondente à intensidade total da luz, I_0 .

¹¹ O processo de calibração utiliza as 6 direções de (3.1), embora apenas 4 delas sejam necessárias em seu funcionamento normal.

O processo de escrita de dados, realizado através das portas D/A, lida com o dobro de valores, pois são necessárias duas tensões – uma em cada atuador – para gerar as 6 birrefringências que produzem as 6 intensidades lidas pelo fotodetector. Portanto, são ao todo 12 tensões escritas por ciclo.

Por motivos de simplicidade, as tensões são escritas na forma de funções degrau, como mostra a figura 15 abaixo.

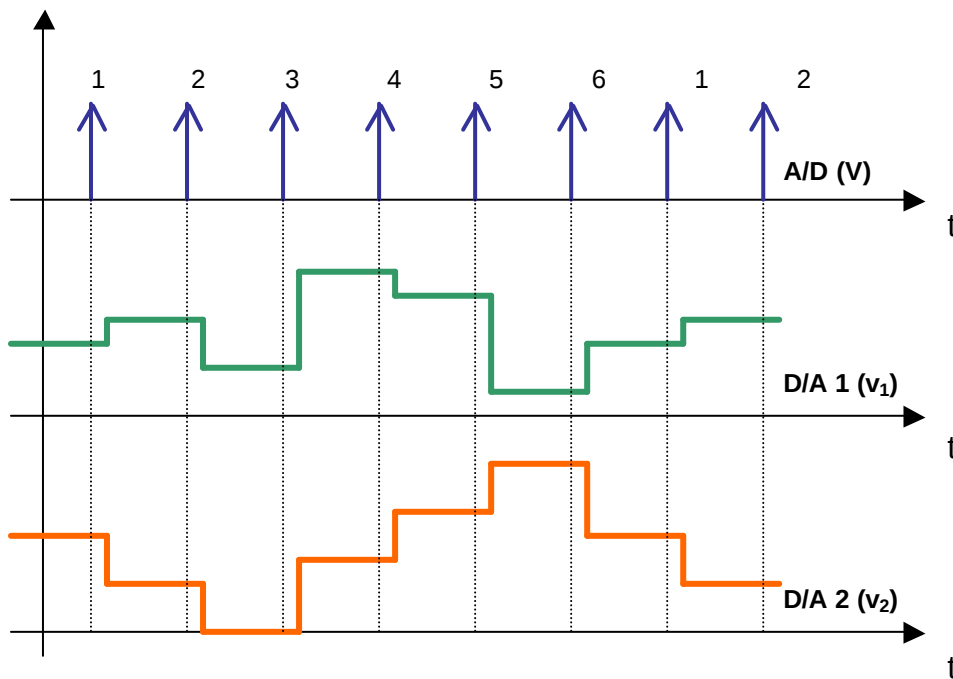


Figura 3: Formas de onda nas portas D/A e suas relações de sincronismo com os instantes de amostragem na porta A/D

Note, observando os gráficos acima, que os instantes de amostragem (representados por impulsos) sempre ocorrem no fim da duração de cada janela de tensão constante. Ou seja, existe uma pequena diferença de fase entre as formas de onda das portas D/A e o trem de impulsos da porta A/D. Essa defasagem é necessária devido à limitação da resposta em frequência dos atuadores piezoelétricos, ou seja, do tempo de assentamento que eles apresentam quando um degrau de tensão é aplicado. Portanto, é importante escolher um defasamento pequeno o suficiente para que a taxa de aquisição de dados seja a mais rápida possível, e grande o suficiente para permitir que os atuadores estejam atingindo o regime permanente.

Para verificar o tempo de resposta do sistema (que também envolve as constantes de tempo das componentes mecânicas), conectamos a saída do

fotodetector ao osciloscópio e aplicamos trens de pulsos quadrados aos atuadores. Apesar da resposta a essa forma de onda apresentar grandes *overshoots* (da ordem de 50%), o tempo de assentamento medido na tela é inferior a 3ms, como ilustra a figura 16. Isso significa que, se forem lidas 4 intensidades por ciclo, teremos uma duração de 12ms por ciclo, correspondendo a uma frequência de 83Hz. Essa é a máxima frequência de aquisição desse modelo de polarímetro quando utilizamos ondas quadradas para gerar as birrefringências.

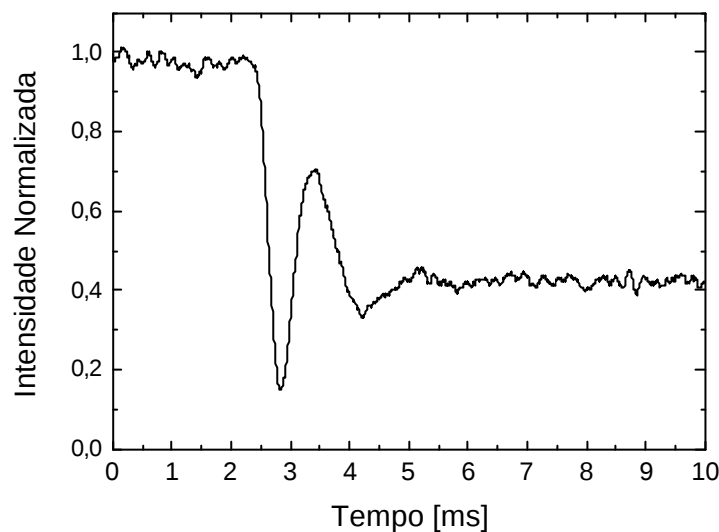


Figura 4: Resposta dos atuadores piezoelétricos a um degrau de tensão.

4.3.3 Geração das Birrefringências

Um “detalhe” ficou faltando nas formas de onda da figura 15: os valores, em volts, que a função assume em cada janela de tempo. De todo o processo de calibração, esse pode ser considerado o mais delicado, pois exige uma série de cuidados práticos que se mostram imprescindíveis para o funcionamento correto do polarímetro.

Apesar de delicada, trata-se de uma etapa de objetivo bem definido: encontrar pares de tensões (v_1, v_2) que, aplicados aos atuadores piezoelétricos, causam uma birrefringência tal que o sistema simula polarizadores nas direções de medida dos parâmetros de Stokes. É importante ressaltar que essa busca envolverá todas as 6 direções de (4.1), e não apenas 4, como será melhor explicado adiante.

Foi visto no capítulo 1 que um polarizador pode ser unicamente descrito através de seu eixo de transmissão. Este eixo, por sua vez, está associado ao estado de polarização que apresenta máxima intensidade na saída do polarizador, de acordo com a Lei de Malus:

$$I = I_0 \cos^2 q \quad (4.2)$$

Onde I_0 é a intensidade na entrada e I a intensidade na saída do polarizador. O ângulo q é medido entre os vetores de Jones que representam o estado de polarização de entrada e o eixo de transmissão do polarizador, e portanto pertence ao intervalo $[0, 2\pi]$. Observe que, dessa forma, (4.2) possui apenas um valor de q que maximiza a intensidade de saída, e um único valor que a anula.

No presente caso, a escolha do eixo de transmissão do polarizador enxergado pela luz na entrada do dispositivo (representado pelo observador da figura 10) é dada unicamente pelas tensões (v_1, v_2) . Portanto, é necessário buscar valores para essas tensões de forma que os polarizadores gerados possuam eixos de transmissão nas direções de interesse em (4.1). Existem duas formas distintas, mas não exclusivas, de se realizar essa tarefa:

- 1) Para cada direção de interesse, configura-se o controlador de polarização CP_1 da figura 14 de forma que o estado de polarização visto pelo polarímetro de referência P_{ref} *coincida* com a direção em questão. Em seguida, busca-se valores de tensões (v_1, v_2) que resultem na *maior* tensão possível V na saída do fotodetector.
- 2) Para cada direção de interesse, configura-se o controlador de polarização CP_1 da figura 14 de forma que o estado de polarização visto pelo polarímetro de referência P_{ref} seja *ortogonal* à direção em questão. Em seguida, busca-se valores de tensões (v_1, v_2) que resultem na *menor* tensão possível V na saída do fotodetector.

Exemplificando: suponha que estejamos interessados em medir a tensão V_E em (4.1). Para isso, é preciso escolher valores de v_1 e v_2 que causem o mesmo efeito de um polarizador na direção circular à esquerda. Para escolher esses valores, temos duas opções. A primeira consiste em configurar CP_1 de forma que a polarização de entrada do dispositivo seja circular à esquerda e, em seguida, buscar valores de tensões que maximizem a intensidade lida pelo fotodetector. A

segunda consiste em configurar CP_1 para que a polarização de entrada seja ortogonal à direção desejada, ou seja, circular à direita, e em seguida buscar valores de tensões que minimizem (ou seja, anulem) a intensidade no fotodetector.

É muito importante que o leitor entenda que os dois métodos produzirão, ao menos teoricamente, exatamente o mesmo resultado. A razão para isso é o fato de todo polarizador também poder ser unicamente representado pelo estado de polarização que é totalmente bloqueado. Apesar disso, o segundo método mostra-se muito mais eficiente na prática, pois é muito mais fácil procurar por um ponto de tensão zero do que por um ponto de tensão máxima (pois em geral não conhecemos esse valor de máximo). Assim, o primeiro método é utilizado apenas para comparação, isto é, para verificar se os resultados são coerentes.

Algumas considerações práticas devem ser levadas em conta nesse processo. A mais importante delas está relacionada ao comportamento das lâminas birrefringentes. Por se tratarem de dispositivos mecânicos, as lâminas apresentam constantes de tempo relacionadas à relaxação mecânica quando estão submetidas a uma tensão. Por essa razão, é muito importante que, durante o processo de calibração, as lâminas já tenham atingido o regime permanente, que no caso é um regime permanente AC dado que as formas de onda variam periodicamente com o tempo.

4.3.4 Refinamento

Após o procedimento inicial de determinação dos 6 pares de tensão através da detecção de pontos de intensidade nula, pode ser necessária uma etapa de refinamento. Isso ocorre, por exemplo, devido à falta de precisão dos instrumentos de medida, que podem detectar intensidade nula ao longo de uma faixa de valores de (v_1, v_2) ao invés de apenas um ponto.

A primeira providência que pode ser tomada é a comparação do valor da tensão V_0 , relativa à intensidade total da onda I_0 , obtida das três diferentes formas possíveis. Essas formas são:

$$\begin{aligned} V_0 &= V_x + V_y \\ V_0 &= V_{45^\circ} + V_{135^\circ} \\ V_0 &= V_D + V_E \end{aligned} \tag{4.3}$$

Se o valor de V_0 obtido para cada uma das linhas de (4.3) for exatamente o mesmo, para todos os estados de polarização de entrada, significa que a escolha das tensões (v_1, v_2) está correta.

Uma outra forma de refinar a escolha das tensões se dá através da observação do valor da intensidade obtida quando o eixo do polarizador enxergado pelo observador forma um ângulo de 90° com o estado de polarização de entrada na esfera de Poincaré. Por exemplo: seleciona-se os valores de tensões (v_1, v_2) que simulam um polarizador na direção linear 45° . Na entrada do dispositivo, ajusta-se CP_1 para que a polarização de entrada seja igual a linear 0° e anota-se o valor de tensão V lida. Em seguida, altera-se a polarização de entrada para linear 90° e anota-se o novo valor de tensão. O mesmo é realizado para as polarizações de entrada linear 135° , circular à esquerda e circular à direita. Se os valores de (v_1, v_2) estiverem corretamente ajustados, todas as tensões no fotodetector anotadas deverão possuir o mesmo valor, que deverá ser exatamente metade do valor da tensão V_0 ¹².

Um terceiro e último procedimento útil no processo de refinamento é observar o valor da soma dos quadrados dos parâmetros de Stokes normalizados obtidos por (3.1). Para a luz polarizada, é preciso que:

$$s_1^2 + s_2^2 + s_3^2 = 1 \quad (4.4)$$

No caso de luz parcialmente polarizada, a soma acima deveria ser igual ao quadrado do grau de polarização (DOP) da luz, que pode ser obtido do polarímetro de referência.

É necessário, no entanto, prestar muita atenção no processo de refinamento, de forma que os requisitos básicos da seção 4.3.3 continuem sendo atendidos. É muito comum que, durante a busca por valores de tensão que atendam a todos os requisitos de refinamento, os requisitos básicos sejam esquecidos, levando a resultados totalmente incorretos.

A figura 17, abaixo, é uma captura de tela do software desenvolvido para calibrar e mostrar os resultados das medidas. Observe que ele possui indicadores de todos os processos de calibração comentados, além de uma tabela com as

¹² Um ângulo de 90° na esfera de Poincaré corresponde a 45° entre os vetores de Jones correspondentes. Pela lei de Malus, $I = I_0 \cos^2(45^\circ) = I_0/2$.

tensões que são aplicadas nos atuadores para obtenção de cada intensidade de interesse para o cálculo dos parâmetros de Stokes.

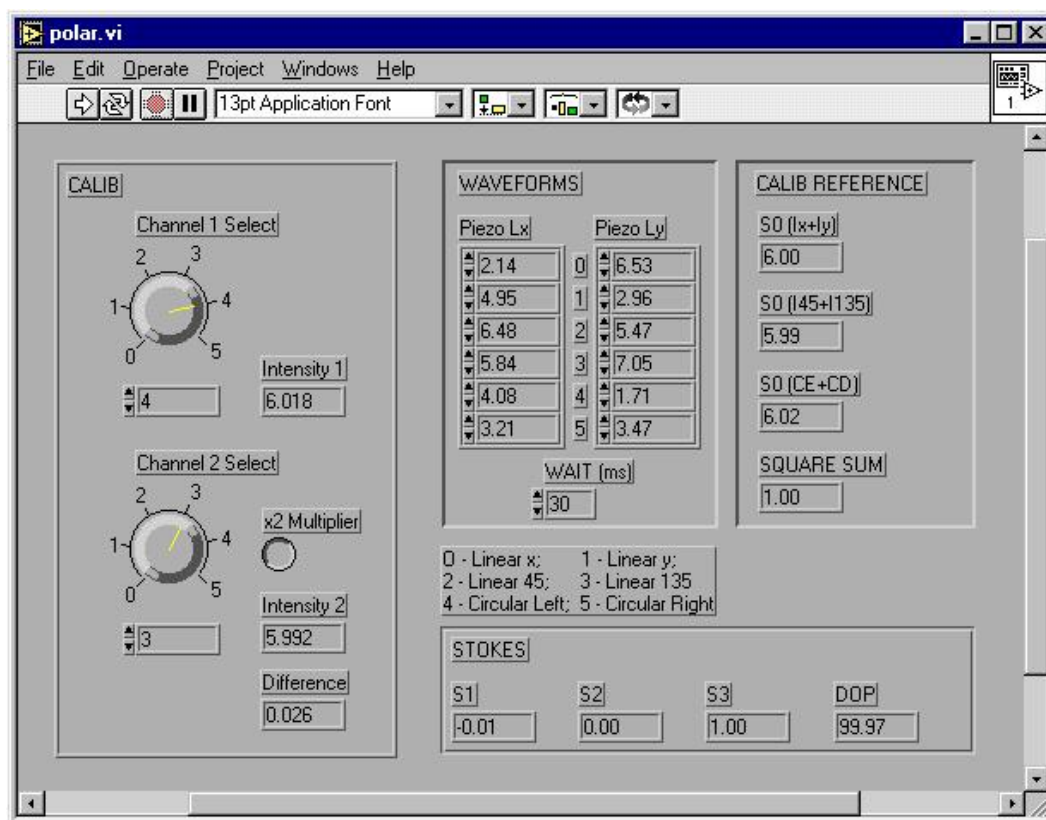


Figura 5: Captura de tela do software desenvolvido em ambiente LabView para calibrar e exibir os resultados obtidos pelo polarímetro.

4.4 Medidas de Luz Polarizada

Após o processo de calibração ser concluído, o protótipo de polarímetro pode agora ser testado. Para isso, são escolhidos estados de polarização aleatórios na entrada do *beamsplitter* (ver figura 14) de forma que eles fiquem uniformemente distribuídos na esfera de Poincaré, e para cada um deles medimos os parâmetros de Stokes com o polarímetro de referência e com o protótipo.

Para os resultados apresentados a seguir, foi utilizado um intervalo de amostragem na porta A/D de 20ms, o que corresponde a uma taxa de aquisição de dados de 8,3 Hz. É importante ressaltar que esse teste não tinha como objetivo avaliar a máxima velocidade possível (que já vimos ser em torno de 83Hz), mas sim verificar se o polarímetro funciona ou não. Por essa razão, foram levadas em

conta as 6 intensidades de (3.1). As figuras abaixo mostram os resultados obtidos em função das leituras do polarímetro de referência.

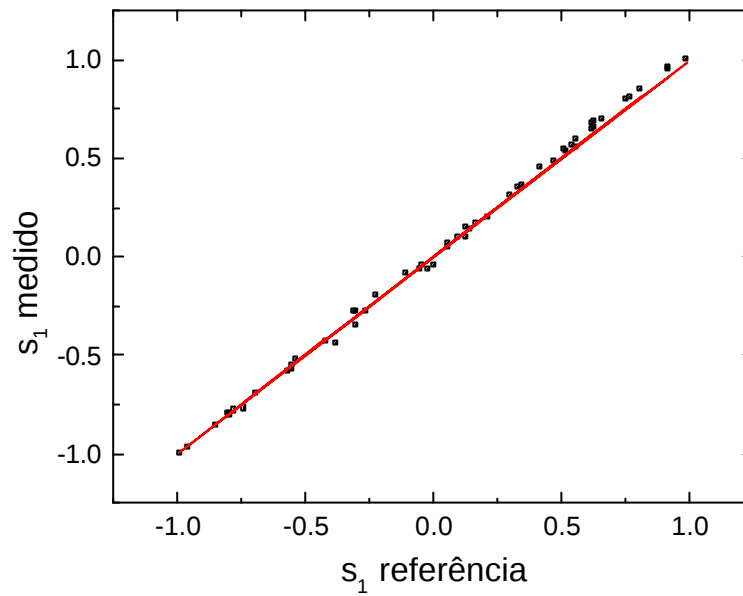


Figura 6: Resultados obtidos para o parâmetro de Stokes S_1

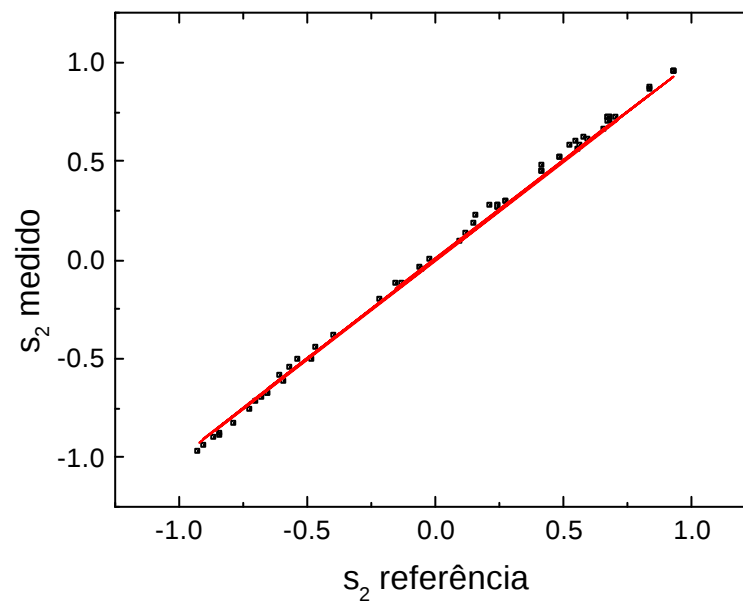


Figura 7: Resultados obtidos para o parâmetro de Stokes S_2

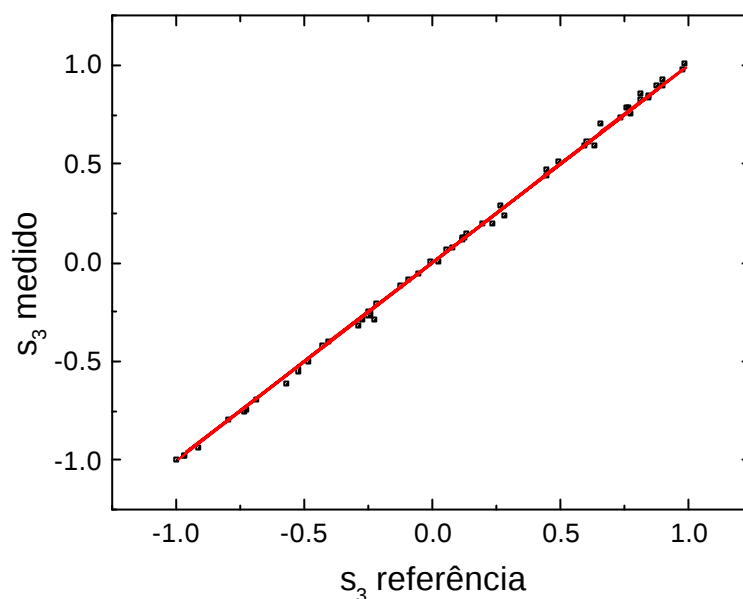


Figura 8: Resultados obtidos para o parâmetro de Stokes S_3

Em todos os gráficos, encontram-se 54 pontos distribuídos no intervalo $[-1,1]$ que é a faixa de valores assumidos pelos parâmetros de Stokes normalizados. A reta vermelha corresponde a uma situação ideal, na qual todas as medidas dos dois polarímetros seriam exatamente iguais.

Alguns comentários devem ser feitos a respeito dos resultados obtidos. Em primeiro lugar, todos os pontos foram obtidos com uma precisão de 2 casas decimais, isto é, em intervalos de 0,01. Como o intervalo de valores vai de -1 a 1, isso corresponde a um total de 200 valores possíveis para um parâmetro de Stokes, isto é, uma precisão de 0,5%. Conforme já foi explicado nesse capítulo, o polarímetro teria, ao menos teoricamente, uma precisão de 0,06%; entretanto, o próprio polarímetro de referência, que possui precisão de 4 casas decimais, apresentava leituras aleatórias nos dois últimos dígitos devido à presença de ruído.

Além disso, é interessante notar que o espalhamento dos pontos obtidos em torno da reta ideal, nos gráficos das figuras 18 a 20, não é o mesmo. A tabela abaixo mostra o erro médio quadrático para cada um dos gráficos.

	Erro Médio Quadrático
s_1	$3,73 \times 10^{-3}$
s_2	$3,76 \times 10^{-3}$
s_3	$3,32 \times 10^{-3}$

Tabela 1: Erro Médio Quadrático para os resultados obtidos

A expressão utilizada para encontrar o erro médio quadrático na tabela acima é dada por:

$$E_{RMS} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N (x - y)^2} \quad (4.5)$$

Onde x é a leitura no polarímetro de referência e y a leitura correspondente no protótipo, para cada parâmetro de Stokes, e N é igual ao número de amostras (no caso, 54). Note que os erros obtidos, apesar de muito parecidos, não são idênticos por duas razões. A primeira delas é o fato da calibração realizada para cada parâmetro de Stokes ser independente das demais, e a segunda está relacionada à escolha de pontos na esfera de Poincaré que não estão uniformemente distribuídos (apesar de estarem próximos disso).

Uma análise imediata e visual dos gráficos nos permite afirmar que os resultados obtidos foram muito bons. O erro médio quadrático baixo comprova esse fato: a distância dos pontos obtidos à reta de referência foi extremamente pequena. Além disso, mostrou-se que o polarímetro obtido não privilegia, em termos de melhor resultado, nenhuma região da esfera, pois a distribuição dos pontos em torno da reta não varia muito conforme o valor dos parâmetros de Stokes varia.

Uma importante limitação foi, no entanto, detectada. O tempo no qual a calibração permaneceu produzindo resultados coerentes como os mostrados acima foi de apenas algumas horas. Podemos atribuir essa instabilidade à natureza eletromecânica do sistema, que é composta por lâminas de latão que vibram e se deformam com o tempo, com enormes constantes de tempo. Uma possível solução para esse efeito consiste em utilizar lâminas de aço; isso já foi providenciado e, no futuro próximo, o efeito da instabilidade será novamente avaliado.

Para finalizar, a tabela 2 mostra os resultados das leituras obtidas para os 6 principais estados de polarização, nos quais foi baseado todo o processo de calibração.

	Referência		Protótipo	
Linear 0°	s ₁	0.99	s ₁	1.00
	s ₂	0.00	s ₂	0.01
	s ₃	0.00	s ₃	0.01
Linear 90°	s ₁	-0.99	s ₁	-1.00
	s ₂	0.00	s ₂	0.02
	s ₃	0.00	s ₃	0.00
Linear 45°	s ₁	0.00	s ₁	-0.01
	s ₂	0.98	s ₂	1.00
	s ₃	0.00	s ₃	0.01
Linear 135°	s ₁	0.00	s ₁	0.00
	s ₂	-0.95	s ₂	-1.00
	s ₃	0.00	s ₃	0.03
Circular à Direita	s ₁	0.00	s ₁	1.00
	s ₂	0.00	s ₂	-0.02
	s ₃	0.99	s ₃	-0.01
Circular à Esquerda	s ₁	0.00	s ₁	0.00
	s ₂	0.00	s ₂	0.01
	s ₃	-0.99	s ₃	-1.00

Tabela 2: Resultados para os 6 principais estados de polarização

Observe que, devido à precisão de duas casas decimais, pode parecer à primeira vista que (4.4) está sendo violada para um valor superior a 1, que é impossível para um polarímetro calibrado corretamente. Este é, inclusive, um dos indicadores utilizados para sabermos se um polarímetro está calibrado ou não.

4.5

Medidas de Luz Parcialmente Polarizada

Como foi comentado anteriormente, todas as medidas realizadas no protótipo utilizaram como fonte de luz um Laser, que gera um sinal de luz totalmente polarizada. Assim, para que fossem realizadas medidas com luz parcialmente polarizada, foi necessário bolar uma montagem experimental na qual fosse possível *despolarizar* a luz do Laser. A figura 21, abaixo, ilustra essa montagem.

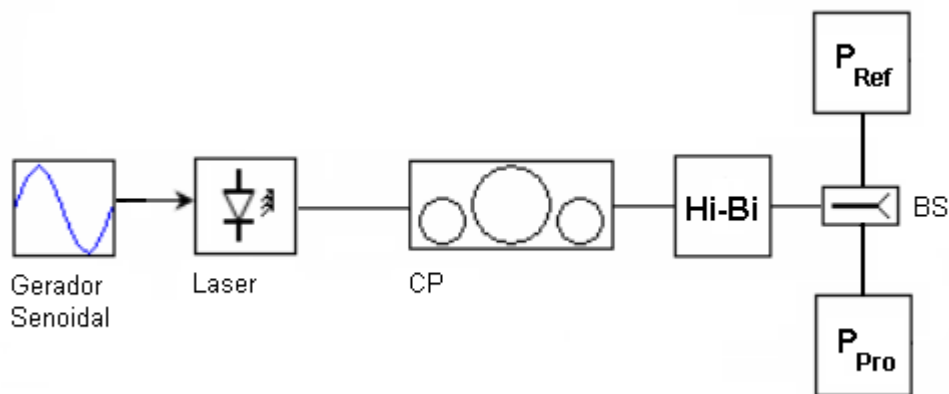


Figura 9: Montagem experimental para medida de luz parcialmente polarizada

Para realizar essa medida é necessário que o polarímetro esteja calibrado pelo procedimento descrito anteriormente. Nesta montagem, o gerador senoidal é utilizado para modular o Laser, de forma que sua largura de linha possa ser aumentada através do aumento da amplitude do sinal de modulação. Em seguida, a luz modulada passa por um controlador de polarização para depois passar por uma bobina de fibra Hi-Bi de 500m. A fibra Hi-Bi é uma fibra na qual a diferença entre os índices de refração em duas direções ortogonais é maior que a encontrada nas fibras comuns, de forma que ela introduz uma alta birrefringência. Depois de passar pela Hi-Bi, os dois polarímetros (de referência e protótipo) são utilizados para analisar o sinal de luz.

O mecanismo de despolarização funciona da seguinte forma: é escolhida uma fibra Hi-Bi de comprimento L grande o suficiente para que a diferença entre os tempos de percurso das componentes rápida e lenta seja maior que o tempo de coerência do sinal de luz. Isto é,

$$\Delta T = \frac{L}{c}(n_1 - n_2) \gg \tau_c \quad (4.6)$$

Se desejarmos criar luz despolarizada a partir de polarizada, basta que seja escolhido um estado de polarização na entrada da fibra Hi-Bi (através do CP) que forme um ângulo de 90° com o eixo da fibra na esfera de Poincaré. Por exemplo, se a direção linear 0° corresponder ao eixo lento da Hi-Bi e a direção 90° corresponder ao eixo rápido, podemos inserir em sua entrada um estado de polarização linear 45° . Isso fará com que metade do sinal seja acoplada ao modo rápido e a outra metade ao modo lento. Quando o sinal de luz chegar ao outro lado da Hi-Bi, as componentes dos eixos rápido e lento estarão totalmente descorrelacionadas, pois o atraso de tempo entre elas é muito maior que o tempo de coerência da luz utilizada. Dessa forma, visto que as intensidades dos dois modos são iguais, a luz na saída da Hi-Bi estará despolarizada.

O grau de polarização (DOP) da luz na saída da Hi-Bi pode, portanto, ser modificando alterando-se o estado de polarização da luz na sua entrada. Por exemplo, se a polarização da luz incidente (polarizada) coincidir com um dos eixos da Hi-Bi, não ocorrerá nenhum atraso entre componentes ortogonais e, assim, a luz na saída também será polarizada. O caso intermediário da luz parcialmente polarizada é obtido quando o estado de polarização na entrada forma um ângulo diferente de 0° ou 90° com o eixo da Hi-Bi na esfera de Poincaré.

Uma forma alternativa de se variar a DOP da luz na saída da Hi-Bi consiste em ajustar o CP para que o ângulo q entre o estado de polarização de entrada e o eixo de birrefringência da Hi-Bi seja de 90° na esfera de Poincaré e depois seja mantido fixo. Em seguida, alteramos a intensidade da modulação do Laser de forma que a largura de linha da luz seja aumentada, isto é, que seu tempo de coerência seja diminuído. Quanto maior a intensidade de modulação, menor será a DOP, até o ponto em que ela chaga a zero.

Para mostrar o comportamento do vetor de Stokes instantâneo na esfera de Poincaré quando a luz é parcialmente polarizada, foi utilizado o polarímetro de referência (Thorlabs) para mostrar a evolução no tempo do estado de polarização da luz na saída da Hi-Bi. Foram utilizados 3 estados de polarização distintos na sua entrada de forma que a DOP pudesse assumir valores próximos de 1, 0 e algum valor intermediário, para uma largura de linha constante.

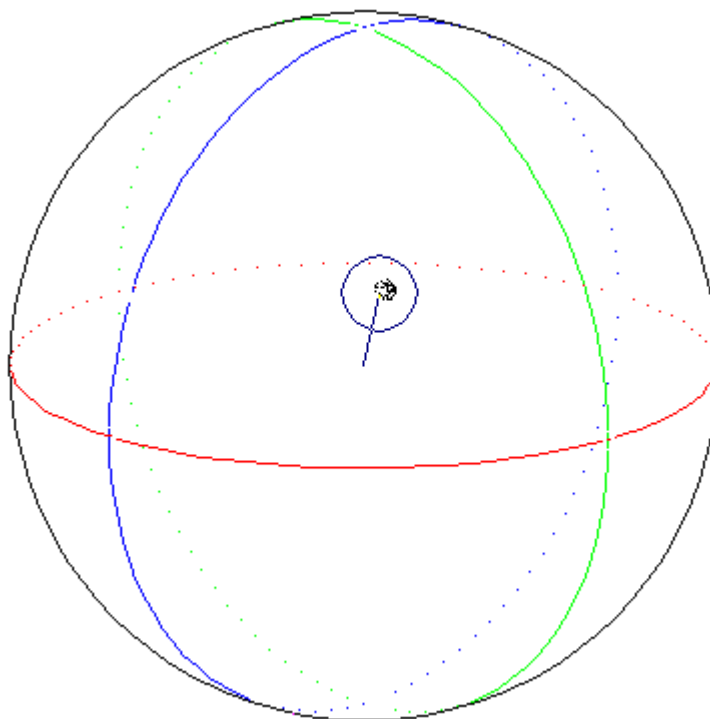


Figura 10: Trajetória do estado de polarização da luz na saída da Hi-Bi quando o SOP de entrada coincide com um dos modos principais da fibra ($q = 0^\circ$)

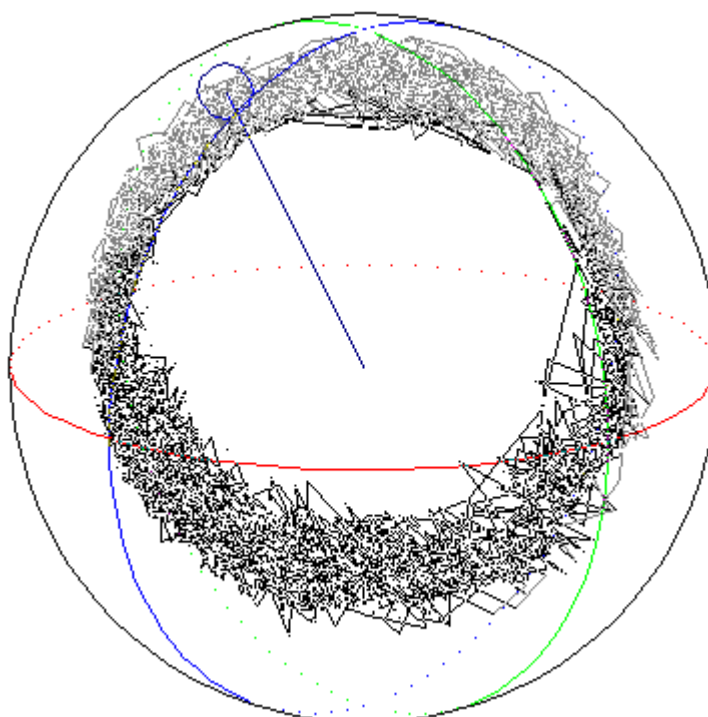


Figura 11: Trajetória do estado de polarização da luz na saída da Hi-Bi quando o SOP de entrada forma um ângulo $q \neq 90^\circ$ com o eixo da fibra.

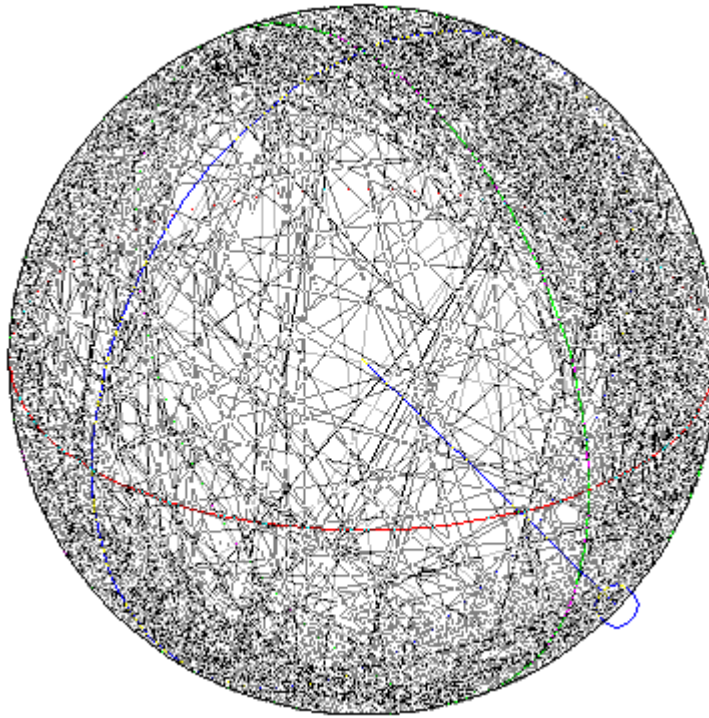


Figura 12: Trajetória do estado de polarização da luz na saída da Hi-Bi quando o SOP de entrada forma um ângulo $q = 90^\circ$ com o eixo da fibra na esfera de Poincaré.

Em todas as 3 situações acima, a birrefringência introduzida pela Hi-Bi estava variando no tempo devido a variações de temperatura, exatamente da mesma forma que a birrefringência introduzida por uma lâmina piezoelétrica varia conforme variamos a tensão aplicada. Portanto, para uma luz polarizada, o percurso do vetor de Stokes na esfera deveria ser um círculo em torno do eixo determinado pelos auto-estados da Hi-Bi.

Na situação da figura 22, a luz incidente na Hi-Bi tem uma polarização que coincide com um dos auto-estados da fibra, e portanto ela praticamente não varia com o tempo já que o eixo da Hi-Bi se mantém constante. Já na figura 23 vemos que a luz já não é mais totalmente polarizada: sua elipse de polarização varia por toda a região hachurada de forma aleatória.

A figura 24 ilustra a situação na qual metade da intensidade da luz incidente na Hi-Bi é acoplada a cada direção principal, resultando em luz quase totalmente despolarizada.

Resta agora comparar os resultados obtidos nos dois polarímetros para a DOP dos diferentes sinais obtidos com diferentes intensidades de modulação (para

um ângulo fixo igual ao utilizado na figura 22). A figura 25, abaixo, compara esses valores.

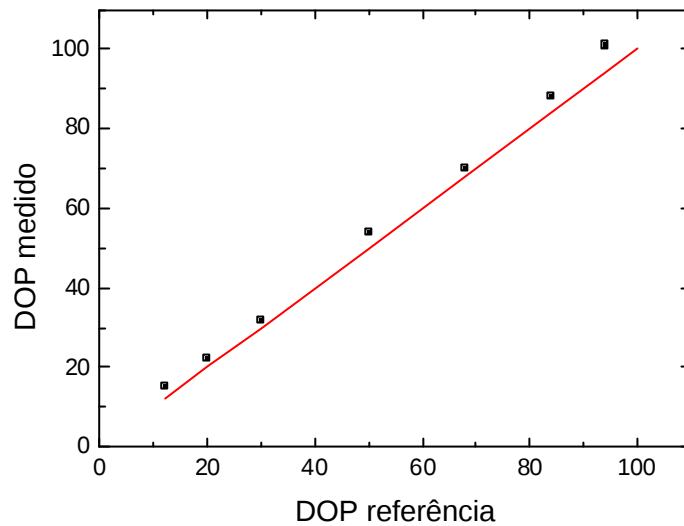


Figura 13: Comparação entre a DOP medida e a indicada pelo polarímetro de referência

É possível perceber, através do gráfico acima, que os valores obtidos no protótipo são muito semelhantes aos valores de referência. A linha reta estabelece o lugar dos pontos em uma situação ideal. Observe que a DOP indicada pelo protótipo foi sempre maior que a obtida pela referência; Esse foi um resultado inesperado, visto que a taxa de aquisição do polarímetro de referência era superior à taxa de 8,3Hz do novo polarímetro utilizada nas medidas. Comportamentos desse tipo já haviam sido observados nas medidas anteriores, nas quais os parâmetros de Stokes indicados pelo polarímetro de referência nunca chegavam a 1.00 como deveriam. Talvez isso se deva à própria calibração da referência utilizada.