

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CAMPUS SÃO MATEUS**

APOSTILA - EXPERIMENTO DE POLARIZAÇÃO DA LUZ

**SÃO MATEUS
2023**

SUMÁRIO

1 EQUIPAMENTOS	03
2 ANALISADOR DE POLARIZAÇÃO	04
3 DIODO DE LUZ VERMELHA	06
4 SENSOR DE ALTA SENSIBILIDADE	07
5 SENSOR DE ROTAÇÃO MOTORA	08
6 TEORIA	10
7 TEORIA PRA TRÊS POLARIZADORES	12
8 MONTAGEM	14
9 PROCEDIMENTO INICIAL PARA DOIS POLARIZADORES	17
10 PROCEDIMENTO PARA TRÊS POLARIZADORES	19
11 GUIA DOS PROFESSORES	21

1. Equipamentos:

1	Polarization Analyzer	OS-8533A
1	Basic Optics Bench (60 cm)	OS-8541
1	Red Diode Laser	OS-8525A
1	High Sensitivity Light Sensor	PS-2176
1	Rotary Motion Sensor	PS-2120
Not included but required:		
1	850 Universal Interface	UI-5000
	PASCO Capstone Software	

2. Analizador de polarização:

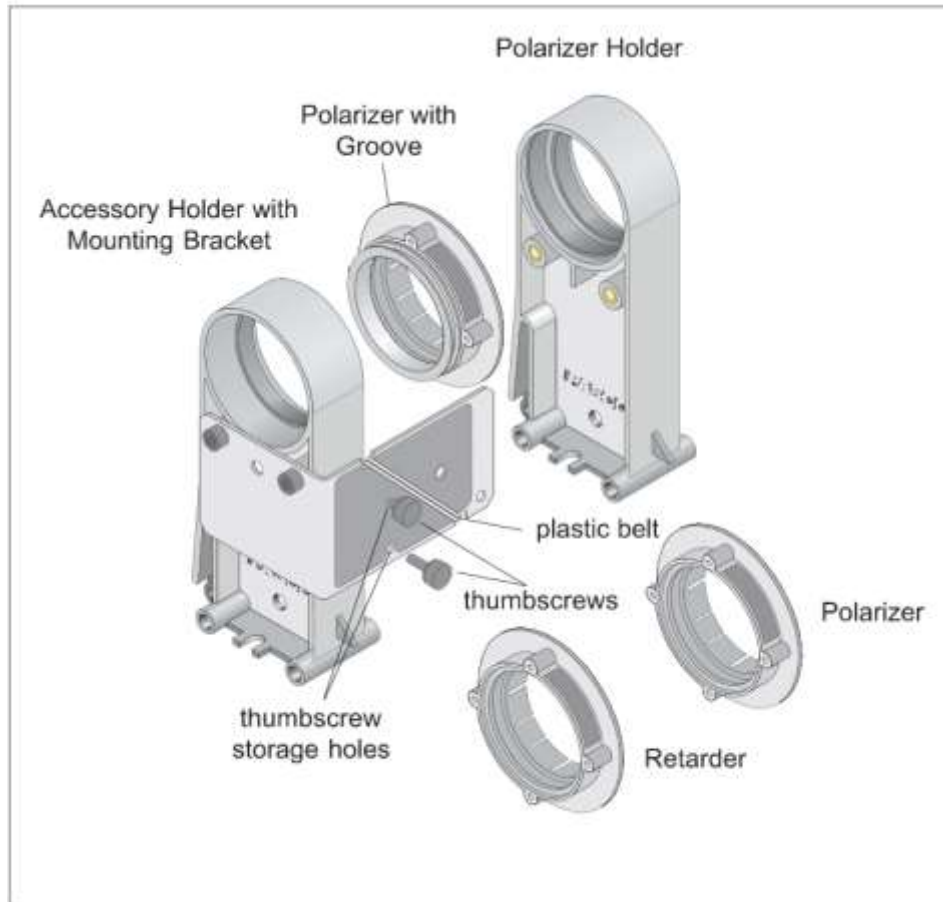


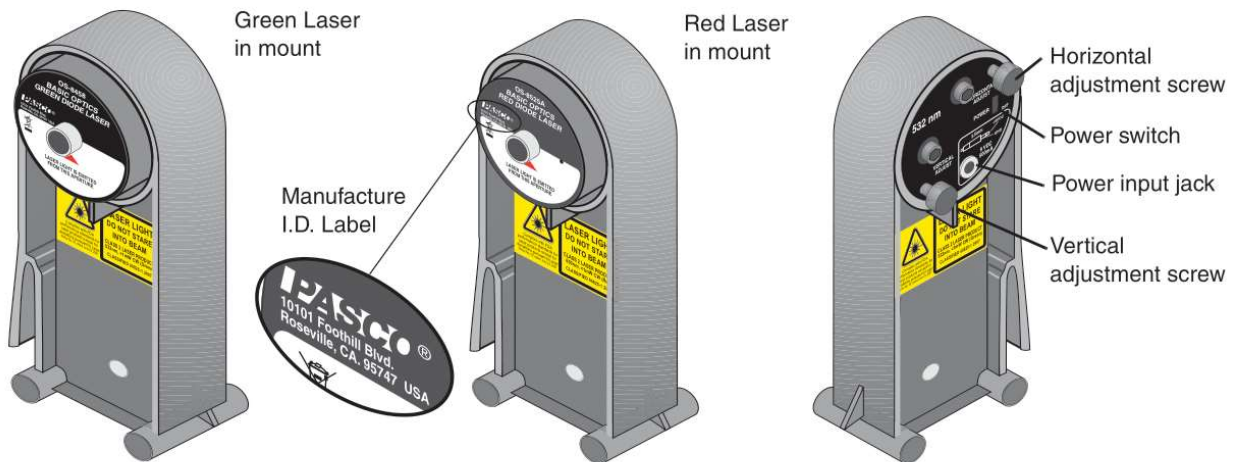
Figura 1: Analizador de polarização e peças afins

Descrição:

O Analizador de Polarização consiste em um Suporte de Polarizador, um Suporte de Acessório com Suporte de Montagem (Accessory Holder with Mounting Bracket), duas Lentes polarizadoras (Polarizers), um Retardador (Retarder) e um Suporte de Abertura. O suporte de montagem está permanentemente ligado ao Suporte de Acessório. O suporte de montagem segura um Sensor de Movimento Rotativo em posição para medir o ângulo de uma lente polarizadora enquanto ela gira em relação a outra lente polarizadora. O suporte de montagem inclui dois parafusos de aperto e uma correia de plástico. Os parafusos de aperto prendem o Sensor de Movimento Rotativo ao suporte. A correia de plástico é usada com um Sensor de Movimento Rotativo. Os Polarizadores e o Retardador encaixam na abertura no topo do Suporte de Acessório ou do Suporte de Polarizador. O Retardador é um retardador de um quarto de comprimento de onda (140 nanômetros). Cada Polarizador possui uma escala angular perto de sua borda externa marcada em incrementos de dez graus, com marcas adicionais a 45, 135, 225 e 315 graus. Um dos Polarizadores possui uma ranhura em sua borda frontal. Essa lente polarizadora deve ser usada com o Suporte de Acessório. Quando o Sensor de Movimento Rotativo está montado no Suporte de Acessório, você pode colocar a

correia de plástico sobre a ranhura na frente da lente polarizadora e uma ranhura na polia de três etapas no Sensor de Movimento Rotativo. Isso permite medir a posição angular do Polarizador enquanto ele gira.

3. Diodo de Luz Vermelha



Included Equipment	Part Number
Green Laser in Mount <i>or</i> Red Laser in Mount	OS-8458 OS-8525A
AC Adapter, 9 VDC output (not shown)	540-007 (120 VAC) <i>or</i> 540-027 and 516-006 (230 VAC)

Figura 2: Diodo de luz vermelha.

Os modelos OS-8458 e OS-8525A da PASCO são lasers de diodo projetados para serem usados com sistemas básicos de ótica da PASCO. Cada laser está permanentemente montado em um suporte que pode ser encaixado em uma bancada de ótica básica da PASCO ou usado de forma independente em uma mesa. O suporte inclui parafusos de ajuste vertical e horizontal para ajustar finamente o ângulo do feixe de laser. Uma fonte de alimentação AC Bivolt está inclusa para fornecer energia.

Montagem:

1. Fixe o laser a uma bancada de Ótica Básica alinhando a base do suporte com o canal central da bancada e pressionando para baixo até encaixar no lugar.
2. Aperte a base do suporte e deslize o laser ao longo da bancada até a posição desejada.
3. Conecte o adaptador AC a uma tomada de parede e à entrada de energia.
4. Deslize o interruptor de energia na parte de trás do laser para ligar ou desligar o feixe.

5. Gire os parafusos de ajuste vertical e horizontal para direcionar o feixe.

4. Sensor de alta sensibilidade:

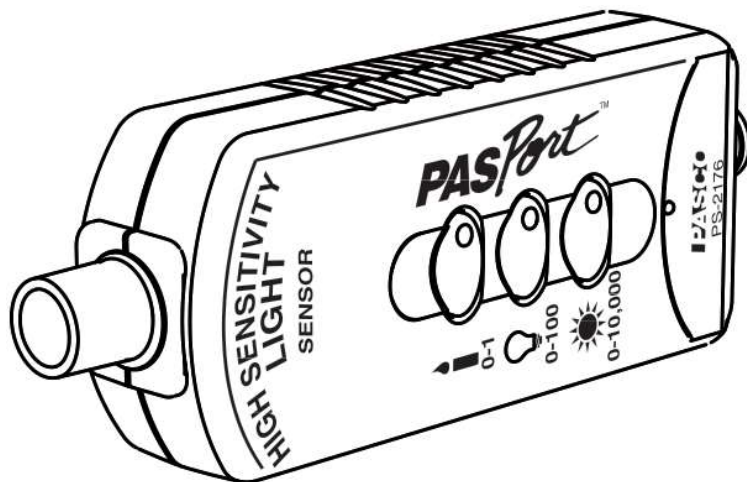


Figura 3: Sensor de luz de alta sensibilidade

Introdução

Os modelos OS-8458 e OS-8525A da PASCO são lasers de diodo projetados para serem usados com sistemas básicos de ótica da PASCO.

Cada laser está permanentemente montado em um suporte que pode ser encaixado em uma bancada de Ótica Básica da PASCO ou usado de forma independente em uma mesa. O suporte inclui parafusos de ajuste vertical e horizontal para ajustar finamente o ângulo do feixe de laser. Um adaptador AC incluso fornece energia.

Início Rápido

1. Conecte o sensor à sua interface PASPORT.
2. Se estiver usando um computador, conecte a interface Pasco Capstone.
3. Pressione um botão no sensor para selecionar uma faixa.
4. Pressione ou clique no botão de iniciar (na interface Pasco Capstone) para começar a registrar os dados.

Configuração

Conectar o Sensor à Interface (Pasco AirLink).

Conecte o sensor a qualquer porta da sua interface PASPORT, seja diretamente ou usando o cabo de extensão incluído.

A interface ou o software detecta o sensor e se prepara automaticamente para a coleta de dados.

5. Sensor de Rotação Motora

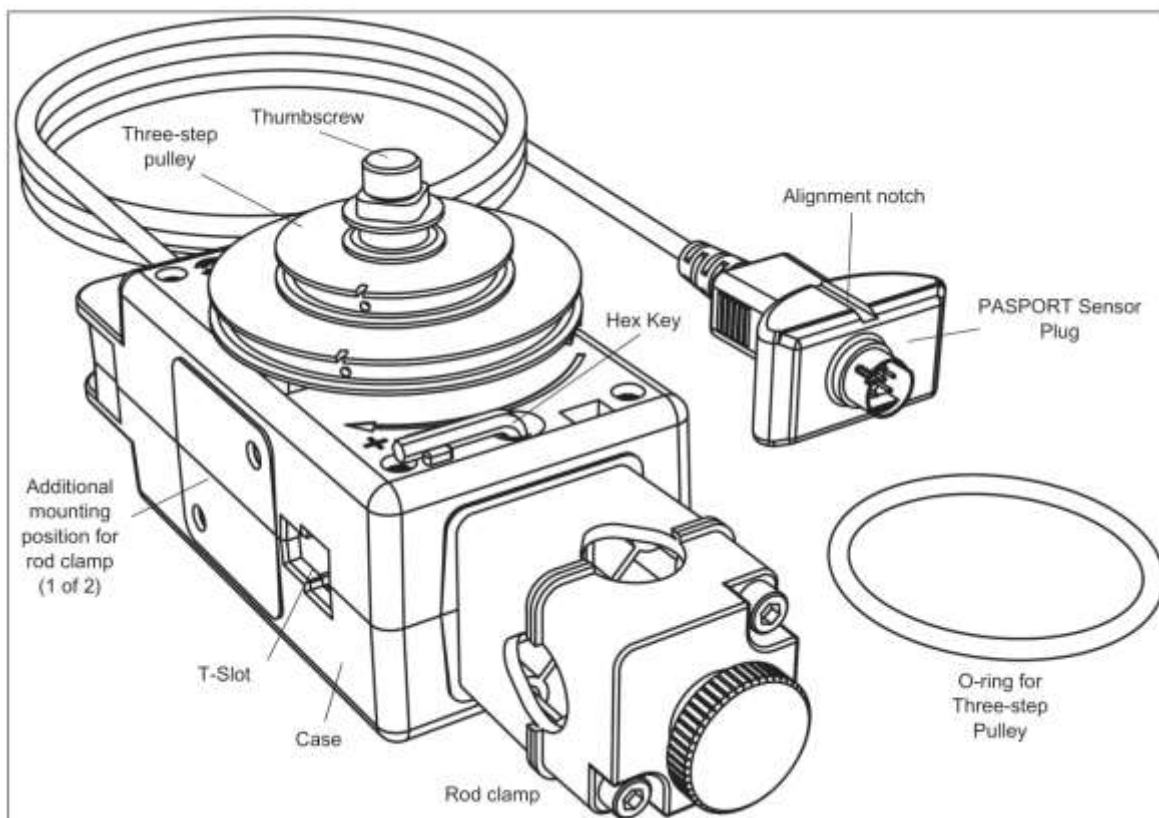


Figura 4: Sensor de rotação motora

Introdução

O Sensor de Movimento Rotativo PASCO PS-2120A é um dispositivo versátil de medição de posição e movimento. Ele mede ângulos com uma resolução de $0,09^\circ$ e detecta a direção do movimento. Marcas na parte externa do case indicam qual é a direção positiva padrão. A roda de código óptico dentro do sensor possui 4000 divisões por revolução (360°), e a velocidade máxima é de 30 revoluções por segundo.

O sensor vem com uma polia removível de três etapas (diâmetros de 10 milímetros (mm), 29 mm e 48 mm) e uma vedação de borracha "O" que se encaixa na etapa de maior diâmetro. A polia de três etapas pode ser fixada em qualquer extremidade do eixo e pode ser colocada com o diâmetro maior para baixo ou para cima no eixo. Uma aba na parte interna da polia corresponde a uma ranhura na parte externa do eixo. A polia possui uma ranhura e um pequeno furo na borda externa das etapas de maior e segunda maior dimensão.

Para anexar uma corda, a chave hexagonal (também conhecida como chave Allen) incluída permite que o grampo de haste seja removido da extremidade do sensor e montado no lado direito ou esquerdo. A chave hexagonal se encaixa no orifício de armazenamento próximo a uma das extremidades do sensor e é mantida no lugar por uma vedação de borracha "O" dentro do sensor.

A extremidade do sensor onde o cabo sai do estojo possui uma plataforma para montar uma Super Polia com Grampo de Mesa (não incluída). O slot em T através do sensor é usado para inserir o acessório opcional de Movimento Linear (rack) (CI-6888). Os dentes da engrenagem no rack se encaixam nos dentes da engrenagem na roda de código ótico dentro do sensor.

Início Rápido

- Conecte o Plug do Sensor a uma porta de entrada PASPORT de uma interface PASCO compatível com PASPORT.
- Inicie o software de coleta de dados da PASCO (como PASCO Capstone ou SPARKvue). Configure uma exibição de dados no software.
- Clique ou pressione 'INICIAR' para começar a registrar os dados. Gire o eixo do Sensor de Movimento Rotativo.

6. Teoria

A luz laser (comprimento de onda de pico = 650 nm) é passada por dois polarizadores. Conforme o segundo polarizador (o analisador) é girado manualmente, a intensidade relativa da luz é registrada em função do ângulo entre os eixos de polarização dos dois polarizadores. O ângulo é obtido usando um Sensor de Movimento Rotativo que está acoplado ao polarizador com uma correia de transmissão. O gráfico da intensidade da luz versus o ângulo pode ser ajustado ao quadrado do cosseno do ângulo, permitindo-nos verificar a Lei de Malus.

Como parte do experimento com os dois polarizadores, demonstramos que o laser de diodo está 100% polarizado. Usamos isso para simular um sistema de três polarizadores. O polarizador que não gira é ajustado perpendicularmente à polarização do laser, de modo que a transmissão seja minimizada. O analisador é então colocado entre o laser e o polarizador fixo, e o estudante descobre que parte do feixe agora é transmitida. Isso permite uma verificação marcante da natureza vetorial do campo elétrico.

Este experimento pode ser realizado com as luzes do ambiente acesas.

Um polarizador permite apenas a passagem de luz que está vibrando em um plano específico. Esse plano forma o "eixo" de polarização. A luz não polarizada vibra em todos os planos perpendiculares à direção de propagação. Se a luz não polarizada incide sobre um polarizador "ideal", apenas metade da intensidade da luz será transmitida através do polarizador.

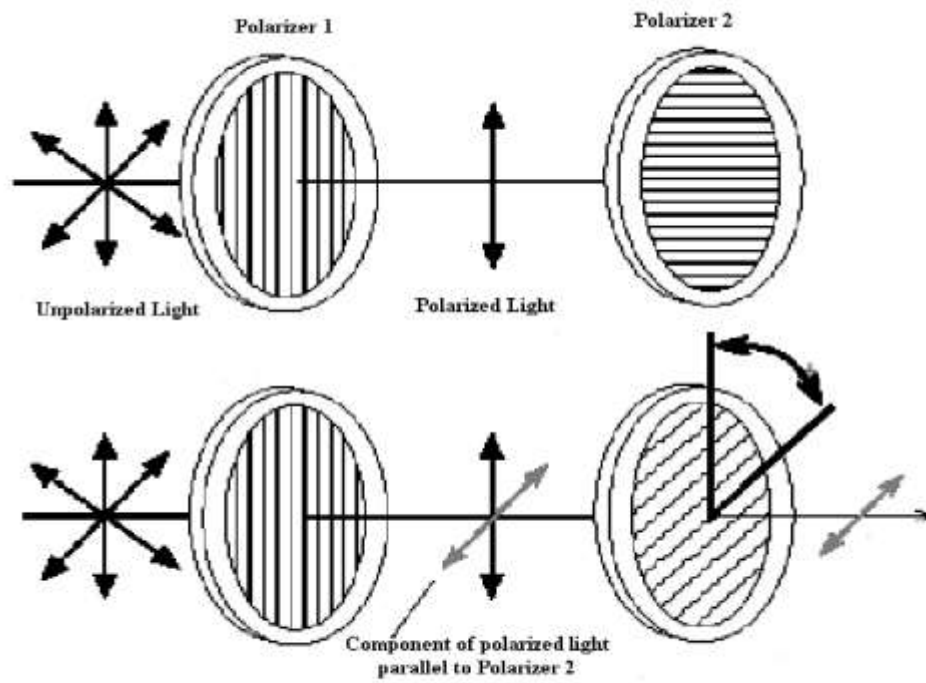


Figura 5: Luz transmitida através de dois polarizadores.

A luz transmitida é polarizada em um plano. Se essa luz polarizada incide sobre um segundo polarizador, cujo eixo está orientado de forma perpendicular ao plano de polarização da luz incidente, nenhuma luz será transmitida pelo segundo polarizador. Veja a Fig.1.

No entanto, se o segundo polarizador estiver orientado em um ângulo não perpendicular ao eixo do primeiro polarizador, haverá uma componente do campo elétrico da luz polarizada que está na mesma direção do eixo do segundo polarizador, e, portanto, alguma luz será transmitida pelo segundo polarizador.

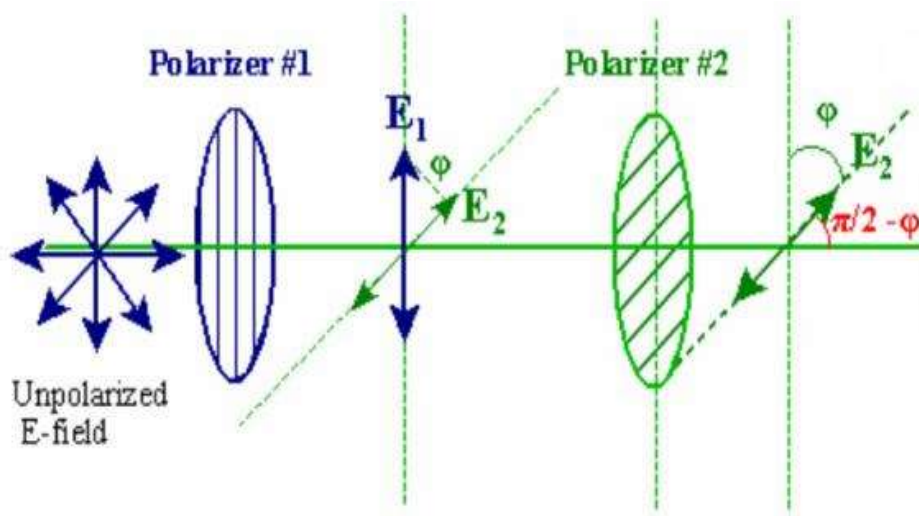


Figura 6: Componente do Campo Elétrico

Se o campo elétrico polarizado for chamado de E_1 após passar pelo primeiro polarizador, o componente E_2 , após o campo passar pelo segundo polarizador, que está em um ângulo ϕ em relação ao primeiro polarizador, é dado por $E_1 \cos \phi$ (veja a Fig.2). Como a intensidade da luz varia como o quadrado do campo elétrico, a intensidade de luz transmitida através do segundo filtro é dada por:

$$I_2 = I_1 \cos^2 \phi \quad (1)$$

7. Teoria para três polarizadores

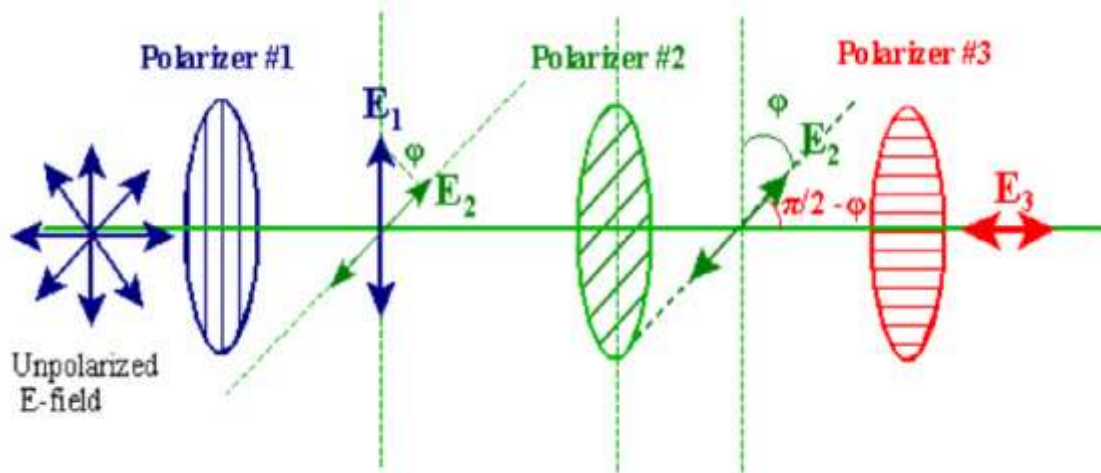


Figura 7: Campo Elétrico Transmitido Através de Três Polarizadores

A luz não polarizada passa por 3 polarizadores (veja Fig.3). O primeiro e o último polarizadores estão orientados a 90° um em relação ao outro. O segundo polarizador tem seu eixo de polarização rotacionado em um ângulo ϕ em relação ao primeiro polarizador. Portanto, o terceiro polarizador é rotacionado em um ângulo $(\pi/2 - \phi)$ em relação ao segundo polarizador. A intensidade após passar pelo primeiro polarizador é I_1 e a intensidade após passar pelo segundo polarizador, I_2 , é dada por $I_2 = I_1 \cos^2 \phi$.

A intensidade após o terceiro polarizador, I_3 , é dada por:

$$I_3 = I_2 \cos^2 (\pi/2 - \phi) = I_1 \cos^2 \phi \cos^2 (\pi/2 - \phi) = I_1 \cos^2 \phi \sin^2 \phi \quad (2)$$

já que $\cos (\pi/2 - \phi) = \sin \phi$.

Usando a identidade trigonométrica, $\sin 2\phi = 2\cos\phi \sin\phi$, nos fornece:

$$I_3 = (I_1/4)\sin^2 2\phi \quad (3)$$

Então, prevemos que a intensidade máxima será quatro vezes menor do que a intensidade máxima no caso de dois polarizadores, e que a intensidade percorrerá um ciclo completo em $\pi/2$ radianos, em vez de π radianos como no caso de dois polarizadores. Isso pressupõe que os polarizadores sejam ideais e transmitam 100% da luz alinhada com seu eixo óptico e 0% da luz perpendicular ao seu eixo óptico. Isso não é verdade para polarizadores reais e esperamos que a intensidade não chegue exatamente a zero. Isso também significa que a intensidade máxima diminui quando mais polarizadores são inseridos no feixe, mesmo que todos os eixos ópticos estejam alinhados com o feixe. Isso não afeta nossos resultados, uma vez que tanto nos experimentos com dois polarizadores quanto nos de três polarizadores, são inseridos dois polarizadores no feixe.

8. Montagem



Figura 8: Experimento montado.

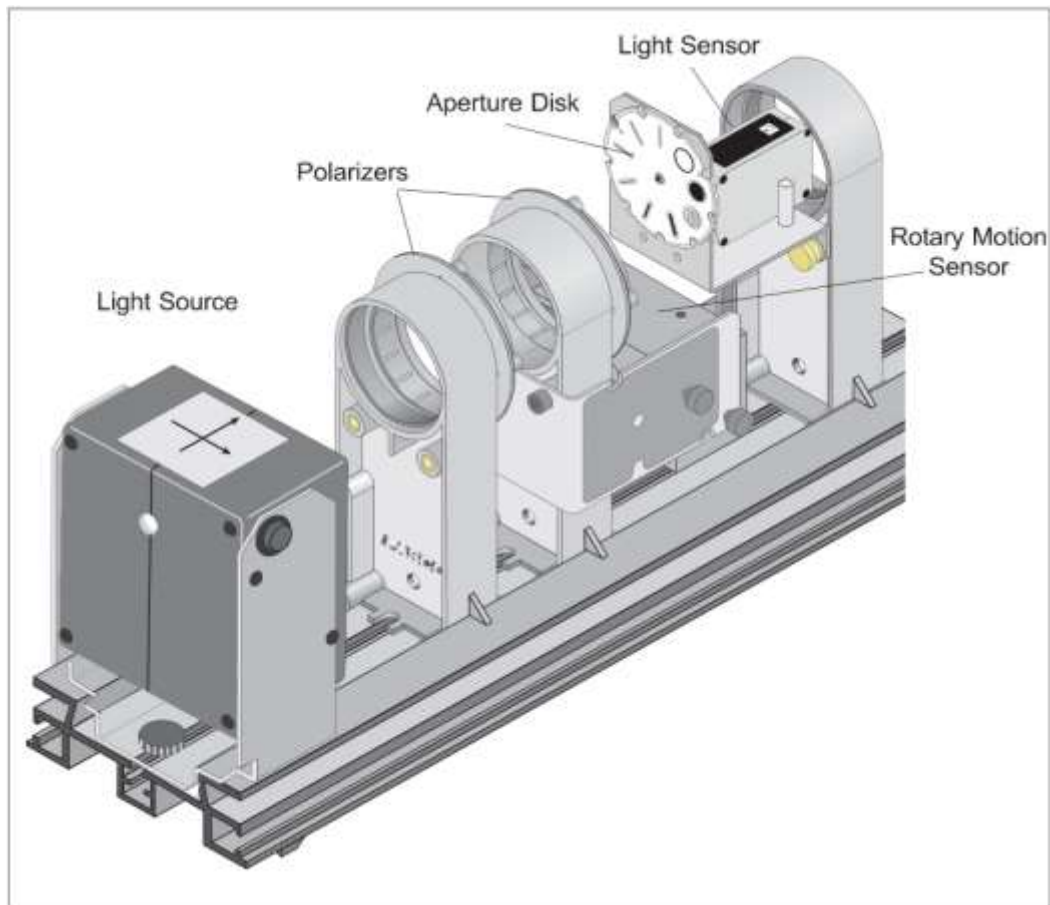


Figura 9: Experimento montado modelo.

1. Monte o disco de abertura no suporte do suporte de abertura.
2. Monte o Sensor de Luz no suporte de abertura com o parafuso de fixação (não a haste de 6 cm) e conecte o Sensor de Luz a uma entrada PASPORT na Interface Universal 850. Pressione o botão de baixa sensibilidade (0-10.000) localizado na lateral do Sensor de Luz.
3. Gire o disco de abertura de forma que a abertura aberta fique em frente ao sensor de luz (veja Figura 5).

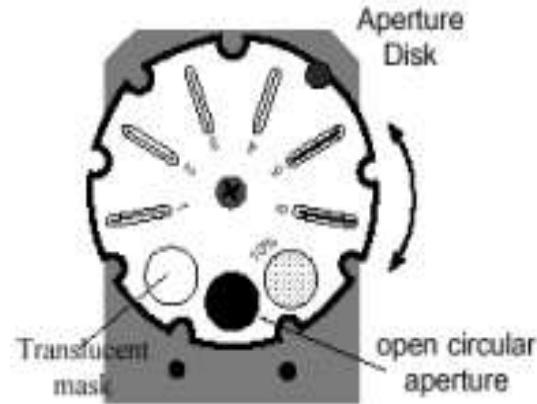


Figura 10: Disco de abertura.

4. Remova o adaptador de fixação da haste preta do Sensor de Movimento Rotativo (RMS) usando a ferramenta anexada. Certifique-se de que a polia no RMS esteja montada de forma que a polia grande esteja voltada para o corpo do RMS. Usando os dois parafusos de montagem armazenados no suporte do Analisador de Polarização, monte o Sensor de Movimento Rotativo no suporte do polarizador de forma que a polia fique voltada para o suporte. Conecte a polia grande do Sensor de Movimento Rotativo à polia do polarizador com a correia de plástico armazenada no suporte de polarização (veja Figura 6).
5. Conecte o Sensor de Movimento Rotativo a uma entrada PASSPORT na Interface Universal 850. Configure à taxa de amostragem comum para 20 Hz.



Figure 11: Sensor de Movimento Rotativo Conectado ao Polarizador com Correia.

6. Empurre todos os componentes na Trilha Óptica o mais próximo possível um do outro. Consulte a Figura 7. O disco de abertura no sensor de luz não deve tocar o Analisador de Polarização. Observe que o sensor de luz errado é mostrado na imagem.



Figura 12: Configuração com componentes na posição para o experiment.

7. No PASCO Capstone, crie um gráfico de Intensidade Relativa (%) em função do tempo e outro gráfico de Intensidade Relativa (%) em função do Ângulo ($^{\circ}$).

9. Procedimento Inicial para dois Polarizadores

Os polarizadores estão alinhados para permitir a passagem máxima de luz.

1. Uma vez que a luz do laser já está polarizada, o primeiro polarizador deve ser alinhado com o eixo de polarização do laser. Primeiro, remova o suporte com o Analisador de Polarização e o Sensor de Movimento Rotativo da trilha. Deslize todos os componentes da trilha para bem próximos um do outro. Clique em "RECORD" e, em seguida, gire o polarizador que não possui o Sensor de Movimento Rotativo em uma rotação completa de 360 graus. Clique em "STOP". Clique na ferramenta de redimensionamento (\square) na barra de ferramentas acima do gráfico para que o gráfico preencha a página. Observe que a intensidade transmitida quase chega a zero (deve ser inferior a 0,5%) duas vezes durante a rotação. Isso comprova que o laser de diodo está 100% (ou quase) polarizado. Os dois valores máximos provavelmente não serão igualmente altos devido ao fato de o polarizador não ser completamente ideal. Clique em "RECORD" e gire o polarizador até que a intensidade da luz no gráfico esteja no máximo (o mais alto dos dois máximos). Clique em "STOP". Fixe o polarizador no lugar com os parafusos de latão.
2. Delete todas as execuções.
3. Para permitir a máxima intensidade de luz através de ambos os polarizadores, substitua o suporte com o polarizador e o Sensor de Movimento Rotativo na trilha, pressione GRAVAR e, em seguida, gire o polarizador que possui o Sensor de Movimento Rotativo até que a



intensidade de luz no gráfico esteja no máximo (veja a Figura 4 na guia "Configuração A"). Clique em PARAR.

4. Clique em "Excluir Última Execução" localizado na parte inferior direita da tela.

Procedimento

1. Observe o ângulo que está no topo do Analisador de Polarização (deve ser 0 ou 180 graus).
2. Clique em GRAVAR e gire lentamente o polarizador que possui o Sensor de Movimento Rotativo em um movimento de 360 graus (uma revolução) na direção que resulta em ângulos positivos. Pare quando a Intensidade Relativa estiver no máximo. Em seguida, clique em PARAR. Tente mover-se lentamente e de forma constante nos pontos de virada. Você pode se mover mais rapidamente entre os pontos de virada.
3. Clique no botão "Resumo dos Dados" à esquerda da tela. Clique em qualquer Execução #1 e renomeie-a para "2 Polar". Clique em "Resumo dos Dados" para fechá-lo.

Análise para Dois Polarizadores:

1. Se o gráfico não preencher a página, clique na ferramenta Redimensionar () no canto superior esquerdo.
2. Posicione o ícone da mão sobre o número mais baixo diferente de zero (provavelmente 2) no eixo esquerdo. Quando a mão se transformar no ícone de placa paralela, clique e arraste até que o número esteja no topo do gráfico. Isso irá esticar a curva para facilitar a visualização do mínimo.
3. Clique no Smart Cursor () na barra de ferramentas do gráfico. Posicione as miras diretamente acima dos mínimos e leia o ângulo (o número à esquerda na caixa) em cada um dos mínimos. Quanto o ângulo mudou indo de mínimo a mínimo a mínimo? Por quê?
4. mudança em ângulo = _____

Ajuste de Curva para Dois Polarizadores

No calculador Capstone, crie um cálculo para a curva teórica:

$$I = [I_{\text{zero}} (\%) * (\cos([\hat{\text{Ângulo}} (\text{rad})] + [A (\text{rad})]))^2 + [B (\%)]] \text{ com unidades em } \%$$

$I_{\text{zero}} = 15$ com unidades em %

$A = 0$ com unidades em rad

$B = 0$ com unidades em %

1. No gráfico de Intensidade Relativa vs. Ângulo, adicione outro eixo vertical e selecione o valor calculado de I.
2. No calculador, $I_{\text{zero}} = I_0 = 15$. Ajuste esse valor para corresponder aos seus dados. A é uma constante que pode ser necessária se você não começou sua medição exatamente do máximo. Isso irá deslocar o gráfico de I para a esquerda ou direita. Ajuste-o, se necessário. B é uma correção caso a intensidade medida não vá até zero. Ajuste-o se necessário.

10. Procedimento para Três Polarizadores



Figura 13: Configuração com Três Polarizadores.

1. Agora repita o experimento com 3 polarizadores. Inverta os dois polarizadores para que o Analisador de Polarização fique mais próximo do laser. Lembre-se de que o laser está polarizado, então essencialmente, o primeiro polarizador está dentro do laser.
2. Remova o Analisador de Polarização. Afrouxe os parafusos de latão no outro polarizador.
3. Clique em GRAVAR e gire o polarizador até que a Intensidade Relativa esteja no mínimo. Clique em PARAR. Aperte os parafusos de latão. Clique em Excluir Última Medição (atenção: não exclua "2 Polar"!!)
4. Coloque o Analisador de Polarização de volta na trilha. Clique em GRAVAR e ajuste novamente o Analisador de Polarização para o mínimo. Clique em PARAR. Clique em Excluir Última Medição (atenção: não exclua "2 Polar"!!)
5. Abra a guia Procedimento e repita como antes, exceto renomeie a medição para "3 Polar".

Análise para Três Polarizadores

1. Clique na seta de exibição de dados () para mostrar mais de um conjunto de dados e, em seguida, na seta preta para selecionar "2 Polar" e "3 Polar".
2. Por que há o dobro de ciclos de "3 Polar" em comparação com "2 Polar"?
3. A Equação 3 da Teoria prevê que os máximos de "3 Polar" devem ser $\frac{1}{4}$ tão altos quanto os máximos de "2 Polar". Isso confere corretamente? Lembre-se de que os polarizadores não são ideais.
4. Qual é o ângulo entre o polarizador do meio e o primeiro polarizador (o eixo de polarização do laser) para obter a máxima transmissão através de todos os 3 polarizadores?
5. Qual é o ângulo entre o polarizador do meio e o primeiro polarizador para obter a mínima transmissão através de todos os 3 polarizadores?

Ajuste de Curva para Três Polarizadores

1. No calculador Capstone, crie um cálculo para a curva teórica:

$$I_3 = [I_1/4 (\%)] * (\sin(2 * [\text{Angle (rad)}] + [C (\text{rad})]))^2 + [D (\%)] \quad \text{com unidades em \%}$$

$I_1/4 = 4.4$ com unidades em %
 $C = 0$ com unidades em rad
 $D = 0$ com unidades em %

2. No gráfico de Intensidade Relativa vs. Ângulo, selecione o cálculo I3 no segundo eixo vertical.
3. Na calculadora, $I_1/4 = I_1/4 = 4.4$. Ajuste esse valor para corresponder aos seus dados. C é uma constante que pode ser necessária se você não começou sua medição exatamente no mínimo. Isso irá deslocar o gráfico de I3 para a esquerda ou direita. Ajuste-o, se necessário. D é uma correção se a intensidade medida não for até zero. Ajuste-o, se necessário.
4. Quão bem a teoria funciona?

11. Guia dos professores

Análise dos dados:

Dados de exemplo:

Na seção de análise de dados, o ajuste de curva para a função polinomial é de segundo grau. Isso indica que a intensidade da luz varia com o quadrado do cosseno de ϕ . Isso é confirmado pelo ajuste de curva para a função linear quando a intensidade da luz é comparada com o quadrado do cosseno.

Respostas para perguntas:

1. Qual é a forma do gráfico da intensidade em relação ao ângulo?
2. Qual é a forma do gráfico da intensidade em relação ao cosseno do ângulo?
3. Qual é a forma do gráfico da intensidade em relação ao quadrado do cosseno do ângulo?
4. Teoricamente, qual porcentagem da luz polarizada incidente no plano seria transmitida através de três polarizadores, cada um com seus eixos girados 17 graus em relação ao outro?
5. Com base no seu gráfico, determine a resposta para a pergunta #4 para os polarizadores reais.