

Exp. 14

Micro-ondas

FSC5144 - Laboratório de Física IV

Versão de 7 de março de 2019

1 Objetivos

2 Introdução

Devido às características das micro-ondas, as mesmas são bastante utilizadas no cotidiano. Elas são utilizadas para o aquecimento de alimentos, em radares, em radio astronomia, em telecomunicações, no acionamento de portões automáticos, etc.

O estudo do comportamento de micro-ondas por analogia com o comportamento de ondas luminosas é denominado óptica de micro-ondas. Podemos estudar os efeitos de reflexão, difração, refração, polarização, etc.

A diferença entre as várias ondas eletromagnéticas está no valor de sua frequência e seu respectivo comprimento de onda. O espectro de frequências é contínuo, não há intervalos definidos, sendo que cada faixa é designada por nomes, mas essas faixas não são muito bem definidas e às vezes se superpõem.

A faixa do micro-ondas está entre 10^{10} Hz e 10^{12} Hz . Com esta frequência as micro-ondas possuem comprimento de onda da ordem de centímetros (cm). Nessas condições os experimentos de óptica de micro-ondas transformam a escala dos experimentos. Usando a luz, cujo comprimento de onda dependendo da cor varia de 400 a 700 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$), são necessárias dimensões da ordem de micrômetros ($1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$) para a visualização dos efeitos, principalmente os de interferência e difração.

As micro-ondas correspondem à faixa mais alta de frequência produzida por osciladores eletrônicos. Frequências mais altas só as produzidas por oscilações moleculares e atômicas.

Moléculas polares como a água podem absorver e emitir energia quando submetidas a ação de um campo eletromagnético, vibrando ou girando os seus constituintes. Os fornos de micro-ondas emitem ondas com frequência próxima ao da frequência de ressonância da água. O interior dos fornos é metálico e como as micro-ondas são refletidas por este material, as mesmas são direcionadas ao centro do forno. Assim as moléculas de água presentes nos alimentos vibram ao entrar em ressonância, aquecendo os alimentos sem aquecer os recipientes de vidro ou plástico, que não absorvem ou refletem as micro-ondas. As micro-ondas agem até a uma profundidade de 5 cm nos alimentos, e as suas partes mais internas e mesmo os recipientes são aquecidos por transmissão de calor por condução.

Como as micro-ondas são capazes de penetrar na atmosfera terrestre, elas são usadas nas telecomunicações para a transmissão de sinais de televisão, ligações telefônicas e dados de computadores. As transmissões podem ser locais, como por exemplo, de uma residência para um provedor, no caso do uso de Internet de banda larga, através de antenas pequenas, ou transmissões de longa distância no caso da telefonia e da televisão com uso de satélites e antenas parabólicas. Unidades móveis de televisão e operadoras de televisão por assinatura sem cabo também utilizam as micro-ondas para transmitir seus sinais, sem interferir nos outros sinais comuns de rádio e televisão.

Com o equipamento de micro-ondas disponível no laboratório, poderão ser realizados diversos experimentos envolvendo óptica de micro-ondas, sendo que nessa disciplina poderemos realizar as seguintes experiências:

1. Reflexão;
2. Refração através de um prisma;
3. Polarização;
4. Interferência e difração de fenda dupla;
5. Medida do ângulo de Brewster.

3 Equipamento

O equipamento de micro-ondas utilizado no laboratório é da Pasco Scientific, modelo WA-9314B, que consiste basicamente de um transmissor e um receptor de micro-ondas, goniômetro, refletores parciais e totais, polarizadores, espaçadores metálicos, plataformas fixa e giratória, entre outros acessórios que serão detalhados em cada experiência. Na figura 1 está ilustrada uma fotografia dos equipamentos.

O transmissor em forma de corneta é formado por um diodo Gunn em uma cavidade ressonante que fornece 15 mW de potência de uma micro-onda linearmente polarizada. A frequência de operação é de 10,525 GHz que corresponde a um comprimento de onda de 2,85 cm. O receptor também em formato de corneta consiste de uma outra cavidade ressonante de 10,525 GHz que utiliza um diodo Schottky. Esse diodo responde somente à onda linearmente polarizada ao longo do seu eixo, produzindo um sinal DC que depende da intensidade da onda transmitida, e para pequenas amplitudes é proporcional à intensidade da micro-onda incidente. O medidor analógico acoplado à corneta receptora pode ser ajustado por um seletor de ganho com quatro posições: 1×, 3×, 10×, e 30×. Esses fatores de multiplicação deverão ser utilizados para normalizar as medidas realizadas em diferentes escalas.

Os diodos utilizados tanto no transmissor quanto no receptor são elementos não lineares. Sendo assim as leituras obtidas no receptor não são diretamente proporcionais nem à intensidade nem ao campo elétrico da onda incidente. Mas na maioria dos experimentos realizados com este equipamento, a não linearidade não causa problemas pois as medidas são comparativas e não absolutas.

Tanto o transmissor quanto o receptor são posicionados por meio de um suporte a 18 cm de altura para minimizar os efeitos de reflexão provenientes da mesa onde são montados os experimentos.

Precaução: Nunca olhe diretamente para a corneta do transmissor quando o mesmo estiver ligado.

Observação 1: Observando a corneta do transmissor de frente, a seção reta da mesma possui o formato de um retângulo. Embora pareça que a polarização da micro-onda é na direção do eixo maior da corneta, é justamente o contrário, ou seja é perpendicular a esse eixo. A transmissão e recepção das micro-ondas são paralelas aos eixos dos diodos e não da corneta. Na marcação de 0° do transmissor, a polarização da micro-onda é vertical.

Observação 2: Em algumas experiências, a posição das pessoas ou objetos próximos ao experimento (transmissor e receptor) podem interferir nas medidas devido às reflexões das micro-ondas. Caso isso ocorra, tente minimizar os efeitos, afastando os objetos causadores e também tente ficar em uma posição que minimize os efeitos que interfiram nas medidas.

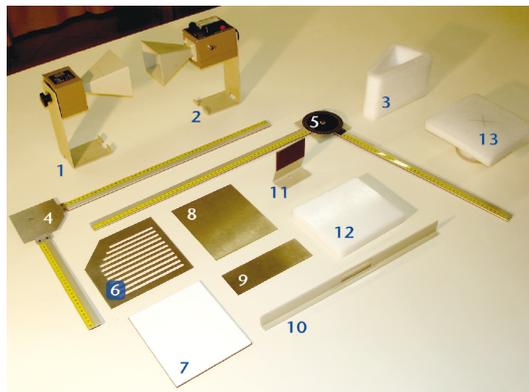


Figura 1 Foto dos equipamentos e acessórios para micro-ondas: 1) Transmissor; 2) Receptor; 3) Molde de prisma de isopor; 4) Suporte com braços fixos; 5) Goniômetro; 6) Polarizador metálico; 7) Refletor parcial; 8) Refletor metálico; 9) Espaçador metálico; 10) Braço extensor; 11) Suporte; 12) Painel de polietileno; 13) Mesa giratória.

4 Teoria Básica

Os fundamentos teóricos completos da maioria dos experimentos a serem realizados podem ser obtidos nos textos dos outros experimentos da disciplina, especialmente os experimentos 11 (Medidas de Índices de Refração), 12 (Interferência e Difração) e 13 (Polarização).

4.1 Refração

Quando uma onda eletromagnética incide sobre uma superfície plana que separa dois meios, parte da energia da onda é refletida e parte é transmitida, sofrendo um

desvio na sua direção de propagação. Este desvio é descrito pela Lei de Snell:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (1)$$

onde θ_1 é o ângulo entre a direção da onda incidente e a normal do dióptro plano e θ_2 é o ângulo entre a onda refratada e a normal. Respectivamente, n_1 e n_2 são os índices de refração do meio da onda incidente e do meio da onda refratada.

A Lei de Snell pode ser utilizada para determinar experimentalmente o índice de refração de um determinado meio material. Basta medir os ângulos de incidência e de refração e conhecer previamente o índice de refração do outro meio (ex: ar, água).

4.2 Ângulo de Brewster

Ainda tratando do caso em que a radiação eletromagnética incide sobre um dióptro plano, como mencionado acima, parte da radiação será refletida em geral. O coeficiente de reflexão dependerá do ângulo de incidência e da polarização da onda incidente. A polarização poderá ser paralela ou perpendicular ao plano de incidência.

Se a polarização for paralela ao plano de incidência, haverá um certo ângulo de incidência para o qual o coeficiente de reflexão é nulo, ou seja, para o qual a transmissão é total. Este ângulo de incidência denomina-se ângulo de Brewster (θ_B) e seu valor depende dos índices de refração n_1 e n_2 :

$$\operatorname{tg} \theta_1 = \frac{n_2}{n_1}. \quad (2)$$

Note que o fenômeno de transmissão total através do dióptro plano ocorre apenas para a polarização paralela, não ocorrendo para a polarização perpendicular.

Importante: Não confundir o plano de incidência e o plano que separa os meios. Eles são planos perpendiculares entre si.

4.3 Fenda Dupla

Quando uma onda eletromagnética passa por uma fenda suficientemente estreita, é possível observar o fenômeno da difração. A observação no campo distante (após propagação a partir da fenda) evidencia um padrão com regiões de máxima intensidade e regiões de mínima intensidade. A difração pode ser observada colocando-se um anteparo no plano de observação (especialmente no caso da luz visível) ou através de um detector posicionado a uma dada distância da fenda.

Quando se utiliza uma fenda dupla, além do fenômeno da difração, haverá também interferência entre as ondas provenientes de cada fenda. Desta forma, dentro das regiões de máximo de difração, haverá também regiões com máximos e mínimos de intensidade devido à interferência. Os ângulos θ onde se encontram os

máximos de diferentes ordens m podem ser calculados utilizando-se a seguinte relação:

$$d \sin \theta = m\lambda \quad (3)$$

onde d é a distância entre os centros das duas fendas e λ é o comprimento de onda. Veja na figura 2 a configuração da interferência e difração de fenda dupla.

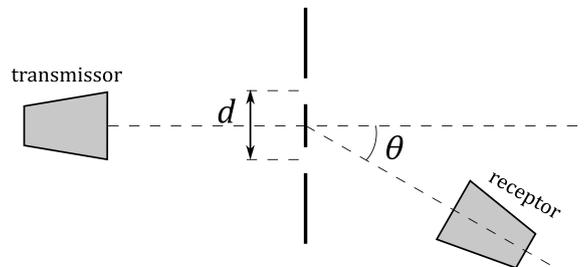


Figura 2 Esquema do experimento de fenda dupla, indicando o espaçamento entre as fendas (d) e o ângulo de detecção (θ).

4.4 Polarização

A micro-onda emitida pelo transmissor é linearmente polarizada na direção do eixo do diodo, ou seja, a radiação propaga-se no espaço com o campo elétrico oscilando paralelamente à direção do eixo do diodo. Assim, a polarização é dada pela orientação do transmissor. Se o receptor estiver com a mesma orientação do transmissor, o mesmo detectará a intensidade máxima. Se o receptor estiver com outra orientação, o mesmo detectará somente a componente da onda incidente que for paralela ao eixo do receptor.

5 Referências Bibliográficas

- Halliday, Resnick e Walker, *Fundamentos de Física*, Vol.3, Ed. LTC
- Sears, Zemansky, Young e Fredman, *Física III*, Ed. Pearson, Addison Wesley.
- Tipler, *Física, Eletricidade e Magnetismo, Ótica*, Vol.2, 4 Edição, Ed.LTC
- Piacentini, Grandi, Hofmann, de Lima e Zimmerman, *Introdução ao Laboratório de Física*, Ed. da UFSC.

6 Experimentos

6.1 Introdução ao Sistema de Micro-ondas

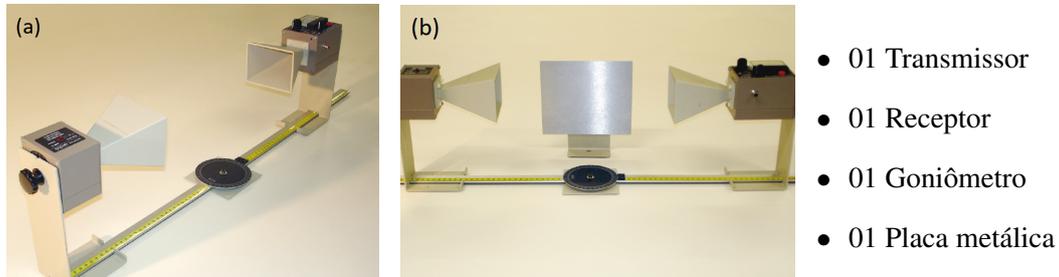


Figura 3 Fotos dos arranjos de introdução ao sistema de micro-ondas.

Procedimento

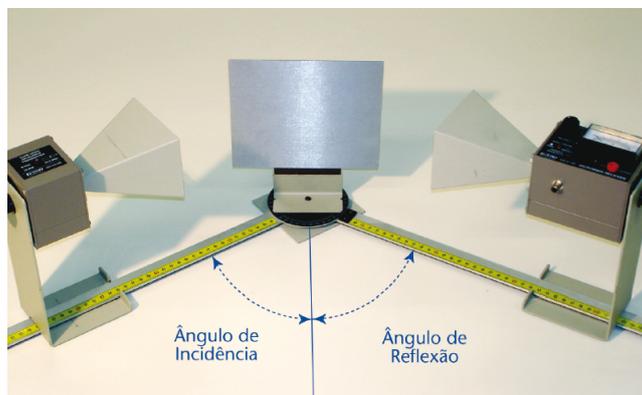
1. Monte o sistema, acoplado o transmissor e o receptor um de frente ao outro, ao goniômetro, conforme indica a figura 3a, sendo que o transmissor deve ser colocado no braço fixo do goniômetro. Ajuste o transmissor e o receptor com a mesma polarização, ou seja, com a mesma orientação da corneta.
2. Ligue o transmissor e o receptor, selecionando a intensidade do receptor em $30\times$. Verifique se a voltagem da rede local é adequada ao transformador do transmissor.
3. Ajuste a distância R entre o transmissor e o receptor em 40 cm. O ponto efetivo de transmissão e recepção dos sinais, situa-se no interior da corneta a 5 cm da sua extremidade (“boca”). Ajuste os botões de intensidade e sensibilidade do receptor até que o medidor marque 1,0.
4. Varie a distância R , aumentando a mesma de 10 em 10 cm, anotando o valor do medidor com o seu respectivo erro de escala, preenchendo a **Tabela 1** até obter a menor medida possível, sem que haja mudança na escala da intensidade.
5. Escolha uma distância R entre 70 e 90 cm. Diminua a distância lentamente, observando simultaneamente a escala do medidor. Descreva o que ocorre com a intensidade lida no medidor.
6. Escolha uma distância R entre 50 e 90 cm. Posicione a placa refletora metálica paralelamente ao eixo de transmissão da micro-onda e em frente ao goniômetro. Veja a figura 3b. Afaste e aproxime a placa do goniômetro e observe o que acontece com o sinal no medidor.
7. Solte o parafuso que prende o receptor com o seu suporte, de tal modo que o receptor possa ser girado. Isso modificará a orientação da recepção do sinal transmitido. Observe o que acontece com o sinal no medidor, girando o mesmo de 360° . Repita este procedimento para o transmissor, mantendo o receptor em uma posição fixa. Observe novamente o que ocorre com o sinal lido no medidor, conforme varia o ângulo de orientação do transmissor.

8. Coloque novamente o transmissor e o receptor com a mesma orientação. Coloque o transmissor o mais próximo do início do braço fixo, próximo à escala do goniômetro. Posicione o receptor o mais longe possível no braço móvel, mantendo inicialmente o receptor de frente para o transmissor. Ajuste a intensidade e a sensibilidade até obter uma leitura máxima de 1,0 no medidor. Gire o braço móvel no sentido horário, anotando o valor lido no medidor com o seu respectivo erro, preenchendo a **Tabela 2**.
9. Posicione novamente o receptor no mesmo eixo do transmissor e gire agora o braço móvel no sentido anti-horário. Observe o que ocorre com o sinal conforme aumenta o ângulo. Esta configuração é simétrica em relação à anterior?

Questionário

1. Por que foi observada uma oscilação do sinal quando se aumentava ou diminuía lentamente a distância entre o transmissor e o receptor? Esse resultado era esperado?
2. A intensidade de uma onda eletromagnética é inversamente proporcional ao quadrado da distância à fonte ($I \propto 1/R^2$). Com os dados da **Tabela 1**, verifique se a leitura do medidor é diretamente proporcional à intensidade da onda, ou seja, verifique que a intensidade lida no medidor possui esta mesma proporcionalidade.

6.2 Reflexão



- 01 Transmissor
- 01 Receptor
- 01 Goniômetro
- 01 Placa metálica
- 01 Suporte giratório

Figura 4 Foto do arranjo para o experimento de reflexão de micro-ondas, com indicativo dos ângulos de incidência e de reflexão.

Observação: Para alguns ângulos (maiores que 60°) o receptor detectará além da onda refletida também a onda incidente proveniente diretamente do transmissor, resultando em medidas enganosas. Tome cuidado com essas medidas e marque com um asterisco os ângulos para os quais esse fenômeno ocorre.

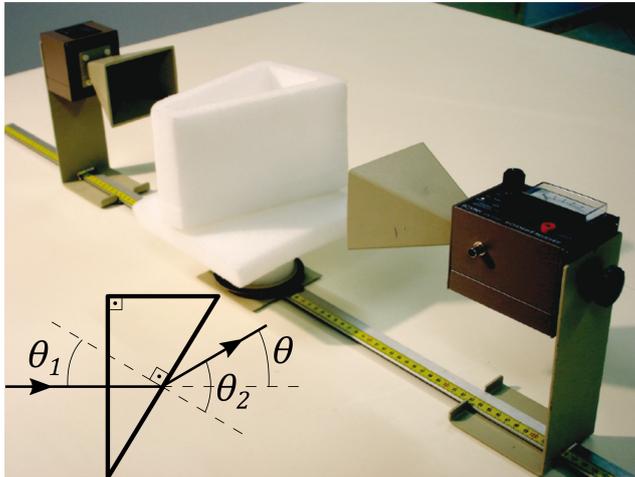
Procedimento

1. Monte o equipamento de acordo com a figura 4, com o transmissor preso ao braço fixo do goniômetro. Ajuste o transmissor e o receptor com a mesma polaridade.
2. Verifique se aproximando totalmente o braço móvel do braço fixo, o ângulo formado entre os dois é um pouco menor que 40° . Se isto não ocorrer, mova o braço no outro sentido e reconfigure o experimento seguindo as orientações mostradas na figura 4.
3. Ligue o transmissor e o receptor, ajustando a intensidade do receptor em $30\times$.
4. O ângulo entre a onda incidente e a linha normal ao plano do refletor é chamado de *ângulo de incidência*. O ângulo entre esta mesma linha normal e o eixo do receptor é chamado de *ângulo de reflexão*. Ajuste o suporte rotativo da placa refletora de tal forma que forme um ângulo de incidência de 45° .
5. Sem mover o transmissor e a placa refletora, gire o braço móvel do goniômetro até obter a máxima leitura no receptor. Meça o ângulo de reflexão.
6. Meça agora para cada ângulo de incidência indicado na **Tabela 3** o respectivo ângulo de reflexão. Meça os dois ângulos com os seus respectivos erros.

Questionário

1. Qual a relação entre o ângulo de incidência e o ângulo de reflexão? Esta relação serve para todos os ângulos de incidência?
2. A relação verificada na questão 1 é válida para qualquer tipo de onda?

6.3 Refração - Prisma



- 01 Transmissor
- 01 Receptor
- 01 Goniômetro
- 01 Mesa giratória
- 01 Molde de prisma de espuma de polietileno
- 01 Recipiente com pelotas de estireno

Figura 5 Foto do arranjo para o experimento de refração através de um prisma, contendo esquema dos raios incidente e refratado pela segunda face oblíqua do prisma (θ_1 : ângulo de incidência, θ_2 : ângulo de refração, θ : ângulo de desvio).

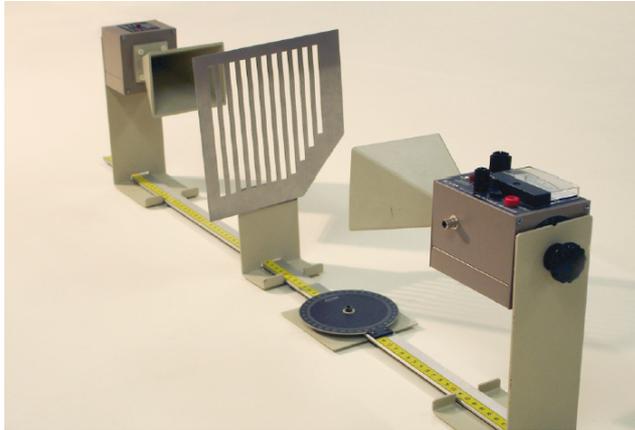
Procedimento

1. Monte o equipamento conforme mostra a figura 5, posicionando o transmissor no braço fixo e o receptor no braço móvel do goniômetro. Gire o molde de prisma vazio, colocado na mesa giratória, e observe se isto afeta a onda incidente, verificando uma possível alteração na medida no receptor. Se ocorrer uma mudança significativa, isto se deve à reflexão, refração ou absorção da onda?
2. Preencha o molde de prisma com pelotas de estireno. Para simplificar os cálculos, alinhe a face do prisma que está mais próxima ao transmissor, perpendicularmente ao feixe da micro-onda incidente.
3. Gire o braço móvel do goniômetro e localize o ângulo θ para o qual o sinal refratado é máximo. O ângulo θ é aquele medido diretamente na escala do goniômetro. Anote θ na **Tabela 4**.
4. Usando o diagrama mostrado na figura 5, determine usando um transferidor o ângulo θ_1 e, usando o valor encontrado de θ , determine o valor do ângulo θ_2 . Anote todos os ângulos encontrados na **Tabela 4**.

Questionário

1. Sabendo-se que o índice de refração do ar é igual a 1,00, use a Lei de Snell e os ângulos encontrados para determinar o índice de refração das pelotas de estireno. Anote o resultado na **Tabela 4**.
2. Se o prisma fosse feito totalmente de estireno sólido, o índice de refração seria o mesmo do encontrado nesta experiência?

6.4 Polarização



- 01 Transmissor
- 01 Receptor
- 01 Goniômetro
- 01 Polarizador metálico
- 01 Suporte

Figura 6 Foto do arranjo para o experimento de polarização utilizando um polarizador metálico.

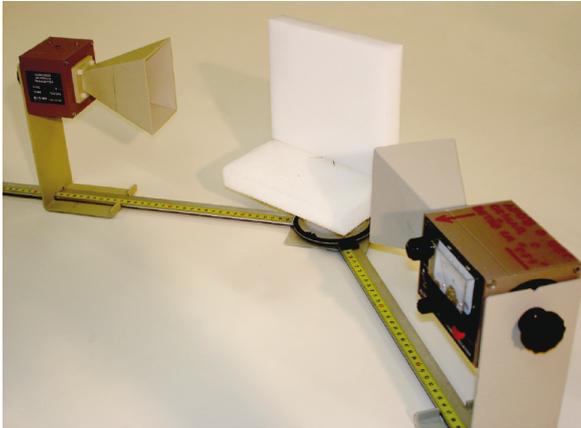
Procedimento

1. Monte o equipamento conforme mostra a figura 3a, posicionando o transmissor e o receptor um de frente ao outro e mantendo ambos na mesma orientação. Ajuste os botões de intensidade e sensibilidade de tal forma que se obtenha a máxima deflexão do medidor do receptor.
2. Solte o parafuso que prende o receptor ao suporte e faça a leitura da intensidade medida com o seu respectivo erro, girando o receptor em torno do seu eixo de 10 em 10 graus. Preencha a **Tabela 5**.
3. O que aconteceria com a leitura do medidor se você continuasse a girar o receptor além de 180°?
4. Monte agora o equipamento conforme mostra a figura 6, adicionando um polarizador metálico com seu respectivo suporte no braço fixo, próximo ao transmissor. Alinhe o transmissor e o receptor com a mesma orientação.
5. Verifique, na configuração acima, qual é a orientação da micro-onda (consulte a Referência 2, na parte da polarização de microondas).
6. Meça a intensidade recebida pelo receptor com as orientações (em relação à horizontal) do polarizador indicadas na **Tabela 6**.
7. Retire o polarizador, mantendo o seu suporte no braço do goniômetro. Gire o transmissor ou o receptor de tal forma que suas orientações sejam perpendiculares entre si. Verifique o que ocorre com a intensidade do sinal recebido.
8. Coloque novamente o polarizador no seu suporte e meça a intensidade de acordo com a orientação de suas ranhuras, preenchendo a **Tabela 7**.

Questionário

1. Verifique se a leitura do medidor é diretamente proporcional ao campo elétrico ($I \propto \cos \theta$), ou ao quadrado do campo elétrico ($I \propto \cos^2 \theta$). Para isso faça dois gráficos com os dados da **Tabela 5**: um com a intensidade em função $\cos \theta$, e outro com a intensidade em função de $\cos^2 \theta$. O gráfico que apresentar os pontos experimentais alinhados por uma reta é a que representa a relação correta.
2. Explique os resultados obtidos na **Tabela 6**. Como a orientação do polarizador modifica a intensidade da onda incidente?
3. Explique os resultados obtido na **Tabela 7**. Faça um diagrama mostrando a orientação da micro-onda saindo do transmissor, passando pelo polarizador e, finalmente, sendo captada pelo receptor.

6.5 Ângulo de Brewster



- 01 Transmissor
- 01 Receptor
- 01 Goniômetro
- 01 Painel de polietileno
- 01 Mesa giratória

Figura 7 Foto do arranjo para o experimento de reflexão com um painel de polietileno para determinação do ângulo de Brewster do material.

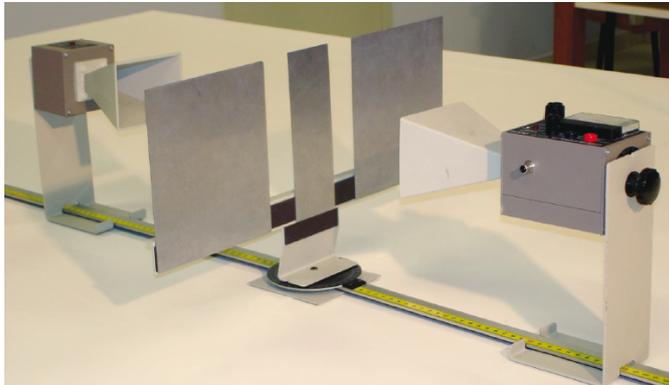
Procedimento

1. Monte o equipamento de acordo com a figura 7, colocando o transmissor no braço fixo e o receptor no braço móvel do goniômetro. Alinhe o transmissor e o receptor com a mesma orientação horizontal (90°).
2. Coloque o painel na mesa giratória em cima do goniômetro e ajuste o painel para que a onda incidente do transmissor faça um ângulo de 20° em relação à normal do painel. Gire o braço móvel do goniômetro até obter a leitura máxima no receptor do sinal refletido pelo painel. Ajuste a intensidade para uma escala intermediária. Anote o valor da intensidade na **Tabela 9**.
3. Sem alterar os ângulos entre o transmissor e o painel e entre o painel e o receptor, mude a orientação do transmissor e do receptor para que ambos possuam a orientação vertical (0°). Anote na **Tabela 9** o valor obtido da intensidade.
4. Repita os itens 2 e 3 para todos os ângulos indicados na **Tabela 9**, preenchendo-a completamente.

Questionário

1. Faça gráficos da intensidade em função do ângulo de incidência, para as duas orientações (horizontal e vertical). Faça os dois gráficos na mesma folha, identificando cada gráfico com uma legenda. Encontre o ângulo de Brewster: ângulo de incidência para o qual a onda horizontalmente polarizada não é refletida.

6.6 Fenda Dupla



- 01 Transmissor
- 01 Receptor
- 01 Goniômetro
- 01 Suporte + braço extensor
- 01 Espaçador estreito (6 cm)
- 01 Espaçador largo (X cm)
- 02 Placas metálicas

Figura 8 Foto do arranjo para o experimento de fenda dupla.

Procedimento

1. Monte o equipamento de acordo com a figura 8, colocando o transmissor no braço fixo do goniômetro e o receptor no braço móvel do mesmo. Coloque o suporte em cima do goniômetro e usando o braço extensor, monte uma fenda dupla utilizando duas placas refletoras metálicas e um espaçador metálico estreito (largura = 6 cm), fazendo com que cada fenda tenha 1,5 cm de largura. Monte o equipamento da maneira mais simétrica possível.
2. Ajuste o transmissor e o receptor com a mesma polarização vertical (0°) e ajuste os controles do receptor para que forneça uma leitura máxima (1,0) com a menor amplificação possível, quando o transmissor e o receptor estiverem um de frente para o outro (0° no goniômetro).
3. Gire vagarosamente o braço móvel do goniômetro e observe o que acontece com a intensidade do sinal medido pelo receptor.
4. Meça e anote na **Tabela 8** os valores da intensidade medida no receptor em função do ângulo de rotação do braço móvel do goniômetro. Se for necessário, mude a escala da intensidade, mas anote o valor normalizado na tabela.

Questionário

1. Faça um gráfico da intensidade medida em função do ângulo com os dados da **Tabela 8**.
2. Calcule teoricamente os valores esperados dos ângulos para os quais se obtêm os máximos e os mínimos de difração. Considere que o máximo de difração de ordem m ocorre no ângulo θ que satisfaz $d \sin \theta = m\lambda$ e que o mínimo de difração de ordem m ocorre para θ tal que $d \sin \theta = (m + 1/2)\lambda$. Compare os valores calculados com os valores obtidos no gráfico da questão anterior. Considere o comprimento de onda $\lambda = 2,85$ cm.

Exp. 14 - Micro-ondas

GRUPO: _____

ALUNOS: _____

TURMA: _____

DATA: _____

➤ Introdução ao sistema de

micro-ondas

Tabela 1. *Intensidade medida em função da distância entre transmissor e receptor*

R (cm)	Intensidade (mA)

Tabela 2. *Intensidade medida em função do ângulo de orientação do receptor*

Ângulo	Intensidade (mA)

➤ Reflexão

Tabela 3. *Determinação do ângulo de reflexão*

Ângulo de incidência	Ângulo de reflexão

➤ Refração através de um prisma

Tabela 4. *Determinação do índice de refração*

θ	
θ_1	
θ_2	
n	

