

# Exp. 16

## Ótica de Micro-ondas

FSC2144 - Laboratório de Física IV

Versão curta, 22 de maio de 2025

### 1 Objetivos

Esta experiência visa observar, no contexto das micro-ondas, os fenômenos previamente observados para a luz visível nas experiências anteriores, dentre os quais:

- Reflexão;
- Refração através de um prisma;
- Polarização.

### 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 radioastronomia, em telecomunicações, no acionamento de portões automáticos, nos roteadores wi-fi, etc.

O estudo do comportamento de micro-ondas por analogia com o comportamento de ondas luminosas é denominado ótica 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 e pode ser dividido em faixas (p. ex. faixa da luz visível, faixa das micro-ondas, etc). Essas faixas, por não terem limites muito precisamente definidos na literatura, às vezes podem se superpor ligeiramente ao comparar diferentes fontes bibliográficas.

O espectro de micro-ondas abrange frequências de 0,3 GHz a 300 GHz, o que corresponde a comprimentos de onda de 1 m a 1 mm, respectivamente. Nestas condições, os experimentos com micro-ondas costumam tomar proporções geométricas maiores que os experimentos similares realizados com a luz visível. Assim, se, para observar com facilidade a difração da luz visível ( $\lambda$  entre 400 e 700 nm) é necessária uma fenda de largura da ordem de 1-10  $\mu\text{m}$ , para observar o mesmo efeito com micro-ondas bastaria uma fenda de alguns centímetros de largura.

As micro-ondas correspondem à faixa mais alta de frequência produzida por osciladores eletrônicos. Frequências superiores são produzidas somente 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.

### 3 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) e 13 (Polarização).

#### 3.1 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  $\theta_1$  é o ângulo entre a direção da onda incidente e a normal do dióptro plano e  $\theta_2$  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).

#### 3.2 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.

## 4 Experimentos

### *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 2 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×. Estes são fatores de atenuação do sinal e servem para ajustar a sensibilidade do detector à faixa de intensidade com que se está trabalhando. Quanto menor o fator de atenuação, maior a sensibilidade do detector (maior sua capacidade de resolver intensidades menores). Os fatores de atenuação deverão ser utilizados para normalizar as medidas realizadas em diferentes faixas conforme a expressão:

$$(\text{valor lido}) \times (\text{fator de atenuação}) = (\text{valor normalizado}).$$

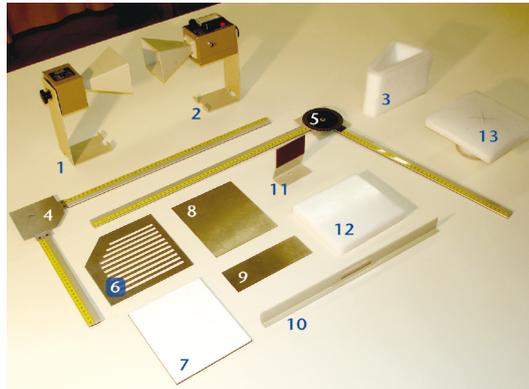
Os diodos utilizados tanto no transmissor quanto no receptor são elementos não lineares. Sendo assim as leituras obtidas no receptor não são diretamente proporcionais nem à intensidade nem ao campo elétrico da onda incidente. Mas na maioria dos experimentos realizados com este equipamento, a não linearidade 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 secção 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  $0^\circ$  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.

## 4.1 Introdução ao Sistema de Micro-ondas

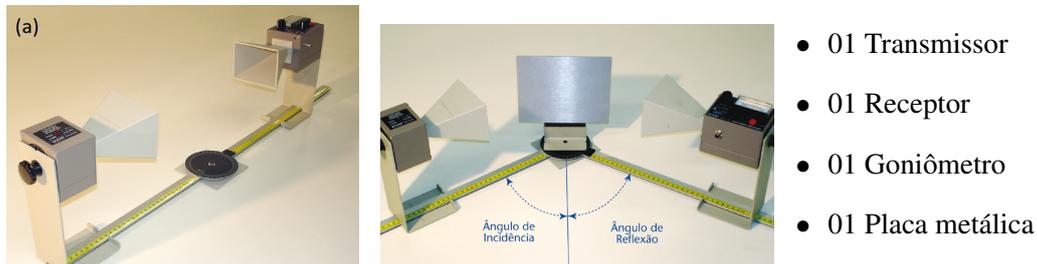


Figura 2 Fotos dos arranjos de introdução ao sistema de micro-ondas.

### 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. **Distância.** 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. Observe o que ocorre com a intensidade lida no medidor.
6. **Orientação do transmissor/receptor.** 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  $360^\circ$ . 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.
7. **Ângulo do braço.** 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 e observe para a queda da intensidade medida conforme se aumenta o ângulo do braço com relação ao eixo inicial. Gire

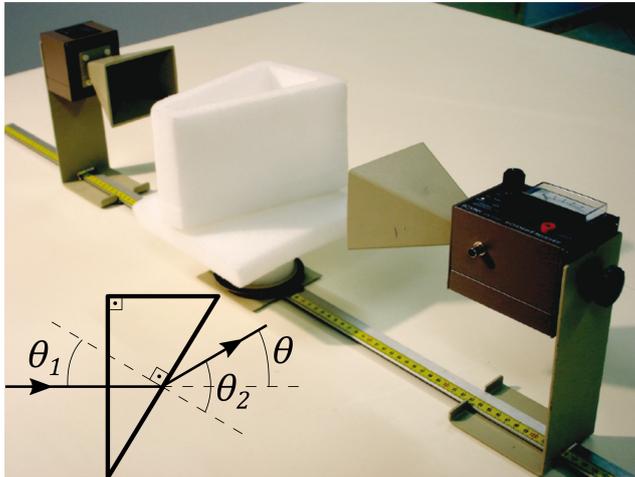
também o braço para o outro lado para verificar se o sistema se comporta de maneira simétrica.

8. **Reflexão.** Monte o equipamento de acordo com a figura 3b, com o transmissor preso ao braço fixo do goniômetro. Ajuste o transmissor e o receptor com a mesma polaridade.
9. Verifique se aproximando totalmente o braço móvel do braço fixo, o ângulo formado entre os dois é um pouco menor que  $40^\circ$ . Se isto não ocorrer, mova o braço no outro sentido e reconfigure o experimento seguindo as orientações mostradas na figura 3b.
10. Ligue o transmissor e o receptor, ajustando a intensidade do receptor em  $30\times$ .
11. 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  $45^\circ$ .
12. 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.

### 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 corrente lida no medidor possui esta mesma proporcionalidade.
3. Qual a relação entre o ângulo de incidência e o ângulo de reflexão medidos? O resultado é compatível com a lei da reflexão?

## 4.2 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 3** 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 ( $\theta_1$ : ângulo de incidência,  $\theta_2$ : ângulo de refração,  $\theta$ : ângulo de desvio).

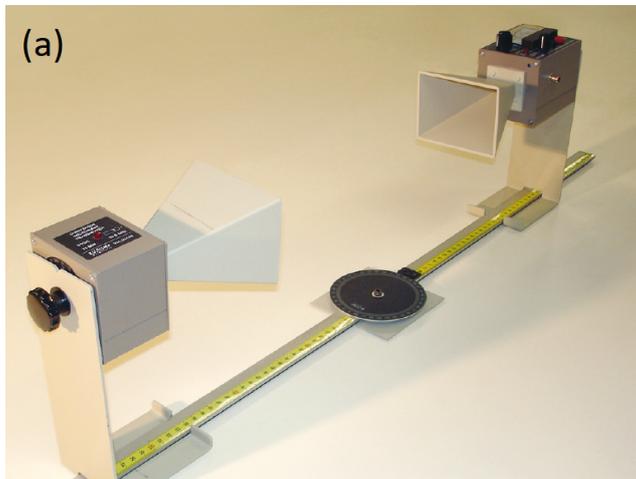
### Procedimento

1. Monte o equipamento conforme mostra a figura 4, 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  $\theta$  para o qual o sinal refratado é máximo. O ângulo  $\theta$  é aquele medido diretamente na escala do goniômetro. Anote  $\theta$  na **Tabela 2**.
4. Usando o diagrama mostrado na figura 4, determine usando um transferidor o ângulo  $\theta_1$  e, usando o valor encontrado de  $\theta$ , determine o valor do ângulo  $\theta_2$ . Anote todos os ângulos encontrados na **Tabela 2**.

### 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 2**.
2. Se o prisma fosse feito totalmente de estireno sólido, o índice de refração seria o mesmo do encontrado nesta experiência?

### 4.3 Polarização



- 01 Transmissor
- 01 Receptor
- 01 Goniômetro

**Figura 4** Foto do arranjo para o experimento de polarização.

#### Procedimento

1. Monte o equipamento conforme mostra a figura 5, posicionando o transmissor e o receptor um de frente para o 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 3**.

#### Questionário

1. Baseando-se nos conhecimentos adquiridos na Experiência 13:
  - (a) qual lei deve reger o comportamento de  $i$  (corrente medida) em função de  $\theta$  (orientação do receptor)?
  - (b) o que aconteceria com a leitura do medidor se você continuasse a girar o receptor além de  $180^\circ$ ?
2. Com os dados da **Tabela 3**, construa um gráfico adequado na tentativa de verificar sua resposta à questão 1(a).

