

# Relatório de Laboratório – EE522

Vitor Bergamaschi Dos Santos - 248212

Vinicius De Lima Quadrado - 225357

Leonardo Souza Boaventura - 250417

## EXPERIMENTO VI: Microondas

Data: 13/06/2025

## 1 Objetivos

Nas seções abaixo seguem os objetivos de cada seção do experimento.

### 1.1 Seção I - Demonstração de Propriedades (de Ondas Eletromagnéticas)

Nesta primeira seção do experimento, um transmissor de microondas será o foco do estudo, onde serão emitidas ondas polarizadas linearmente, a uma frequência de 10,525 GHz. Os estudos envolvem a leitura destas ondas de tensão por meio de um receptor de microondas, que tem posicionamento controlado por um goniômetro, dessa forma, busca-se entender o comportamento de eletromagnéticas no espaço e suas interações com diferentes meios de propagação. Dentro desta seção será feito experimentos de reflexão, refração, condução em fibra óptica e polarização de microondas.

- Refração: verificaremos a validade da lei da reflexão, que postula a igualdade entre ângulos de incidência e reflexão, utilizando microondas.
- Refração: será determinado experimentalmente o índice de refração de um material dielétrico através da lei de Snell.
- Fibra óptica: Verificaremos o conceito de ângulo crítico aplicado a propagação de microondas em meios confinados.
- Polarização: Será analisado os efeitos da polarização em microondas, aplicando filtros e verificando como estes afetam a transmissão e recepção do sinal.

### 1.2 Seção II - Cálculo da frequência da fonte

Nesta seção o objetivo é determinar a frequência da fonte emissora de microondas, sendo esta uma seção importante para validar a especificação do equipamento (10,525 GHz) e compreender a relação entre frequência, comprimento de onda e velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas. Para tal usaremos dois métodos:

- Analisar o padrão de interferência formado por máximos consecutivos de intensidade detectados pelo receptor. A distância entre máximos será utilizada para calcular o comprimento de onda.
- Medir a cavidade metálica de ressonância e analisar os modos dominantes de propagação, possibilitando o cálculo da frequência da onda.

### **1.3 Seção III - Caracterização da antena**

Nesta última seção iremos realizar a caracterização do padrão de radiação emitidos nos planos de campo elétrico (plano E) e campo magnético (plano H). Possibilitando visualizar a direcionalidade da antena, um fator muito importante no projeto de sistemas de comunicação por ondas eletromagnéticas.

## **2 Procedimento Experimental**

Nas seções abaixo seguem os procedimentos experimentais de cada seção do experimento.

### **2.1 Seção I - Demonstração de Propriedades (de Ondas Eletromagnéticas)**

Nesta seção será apresentada a montagem, equipamentos utilizados e procedimento de execução dos experimentos de reflexão, refração, condução em fibra óptica e polarização de microondas.

#### **2.1.1 Reflexão**

Nesta seção será apresentada a montagem, equipamentos utilizados e procedimento de execução do experimento de reflexão.

##### **2.1.1.1 Montagem**

O aparato experimental para o estudo da reflexão de microondas foi montado conforme o diagrama da Figura 2, na figura 1 pode-se verificar a real montagem, com o transmissor e receptor de microondas dispostos no goniômetro:

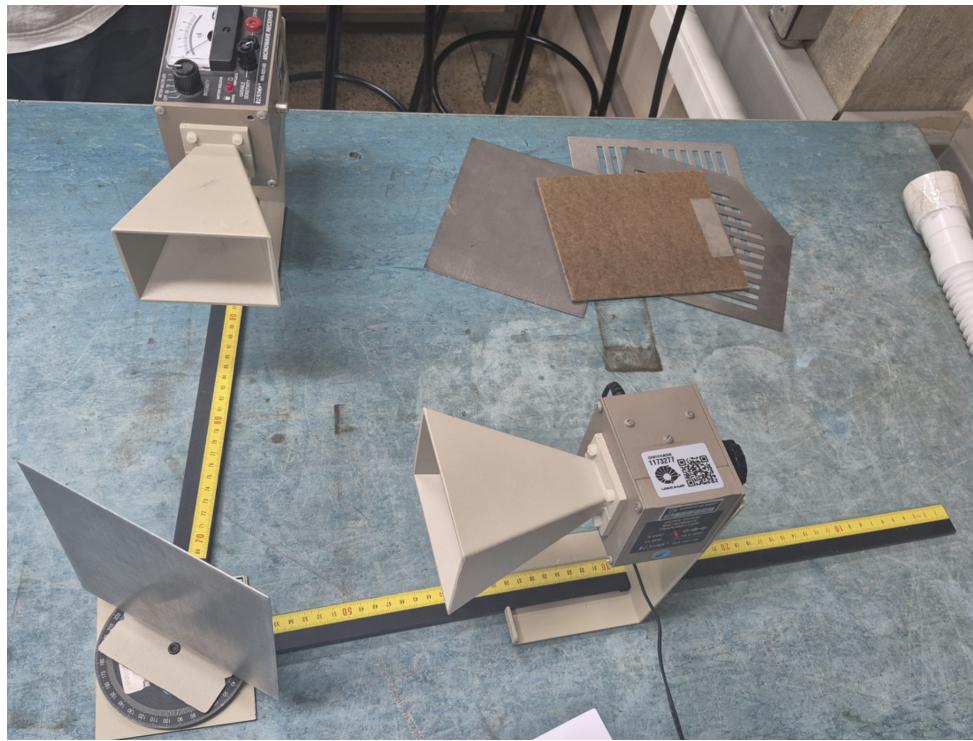


Figura 1: Montagem do experimento de reflexão de microondas.

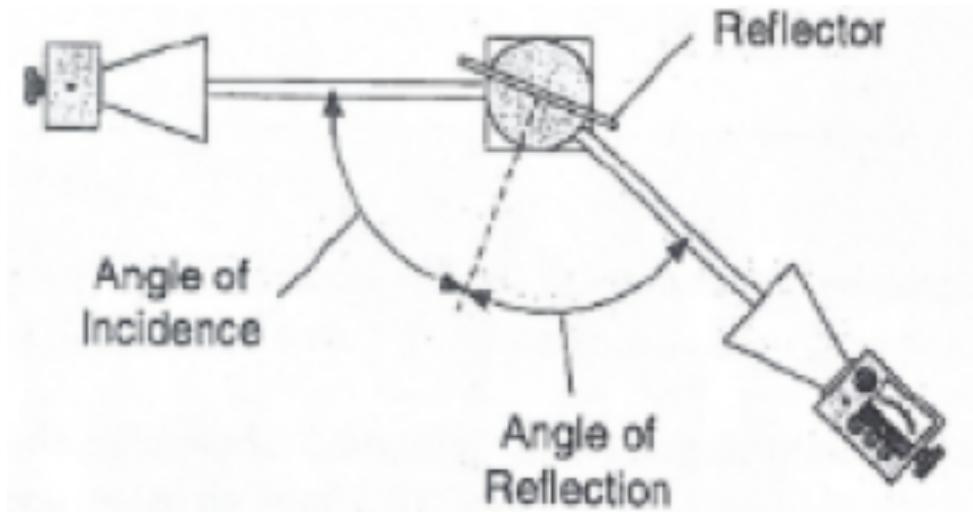


Figura 2: Ângulo de incidência e reflexão em microondas.

#### 2.1.1.2 Equipamentos utilizados

Foram utilizados um goniômetro, um transmissor de microondas (com frequência de emissão de 10,525 GHz), um receptor de microondas, um suporte para anteparo e um anteparo metálico para a reflexão das ondas.

#### 2.1.1.3 Execução

A primeira propriedade de ondas eletromagnéticas aferida neste estudo foi a reflexão. O intuito é aferir o ângulo de reflexão do feixe de microondas em relação a um determinado

ângulo de incidência imposto. O goniômetro é o elemento crucial para esta medida, visto que permite manipular o ângulo de posicionamento dos dispositivos com precisão. Na figura 2 é possível ver o resultado esperado em relação ao ângulo de incidência e reflexão, onde o ângulo de incidência  $\theta_i$  é igual ao ângulo de reflexão  $\theta_r$ .

Na tabela 1 pode-se conferir os resultados mediante 4 medições, ou seja, para cada ângulo de incidência dado, o ângulo de reflexão é determinado a partir do posicionamento angular do receptor que confere a leitura do sinal de valor máximo:

Ângulo de incidência ( $\theta_i$ )	Ângulo de reflexão ( $\theta_r$ )
40°	40°
50°	50°
60°	58°
70°	67°

Tabela 1: Resultados da reflexão de microondas.

## 2.1.2 Refração

Nesta seção será apresentada a montagem, equipamentos utilizados e procedimento de execução do experimento de refração.

### 2.1.2.1 Montagem

Para a análise da refração de microondas, ao invés de um anteparo metálico agora utilizamos um prisma de isopor preenchido com grânulos de estireno, de forma que se espera o desvio do feixe de ondas em um determinado ângulo de refração. A figura 3 ilustra a montagem do experimento, onde o transmissor e receptor estão posicionados no goniômetro, com o prisma de isopor entre eles.

Observação: na figura 3 o prisma não está cheio de grânulos de estireno, pois a fotografia foi tirada antes de completar a montagem, mas o experimento foi realizado com o prisma preenchido.

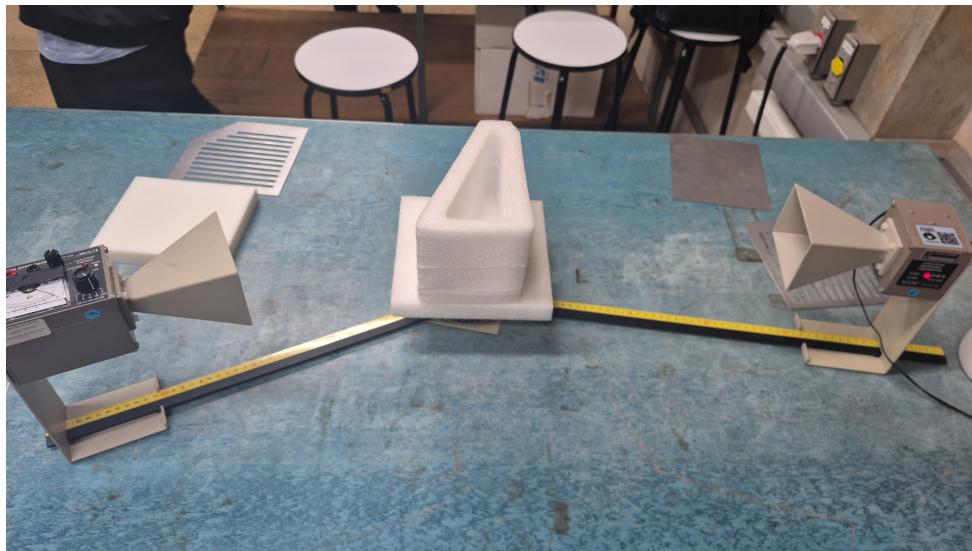


Figura 3: Ângulo de incidência e refração em microondas.

### 2.1.2.2 Equipamentos utilizados

Para esta montagem foram utilizados, além do conjunto transmissor, goniômetro e receptor, um prisma de isopor preenchido por granulos de estireno e um suporte para o prisma, como representado na figura 4.

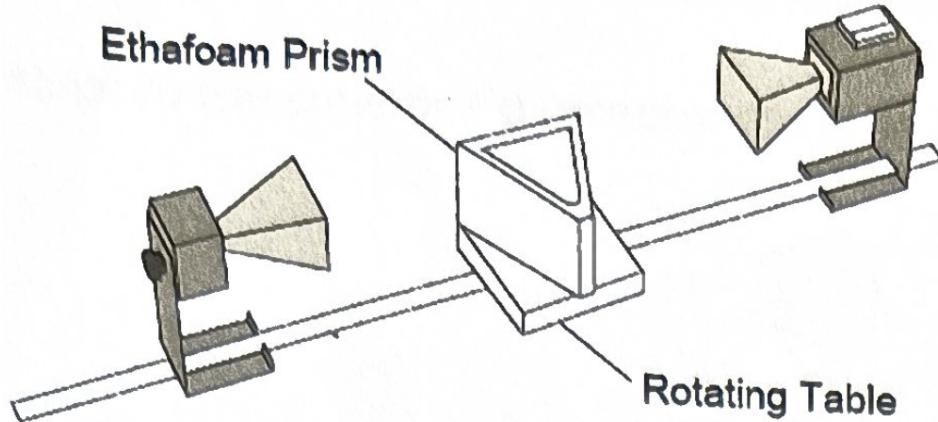


Figura 4: Esquema da montagem do experimento de refração de microondas.

### 2.1.2.3 Execução

Assim como no estudo da reflexão, aqui procura-se o ângulo que confere a máxima leitura de sinal pelo receptor. Rapidamente, utilizando o goniômetro, é possível aferir o ângulo de refração  $\theta_r = 11^\circ$ . A figura 5 abaixo ilustra o ângulo encontrado:

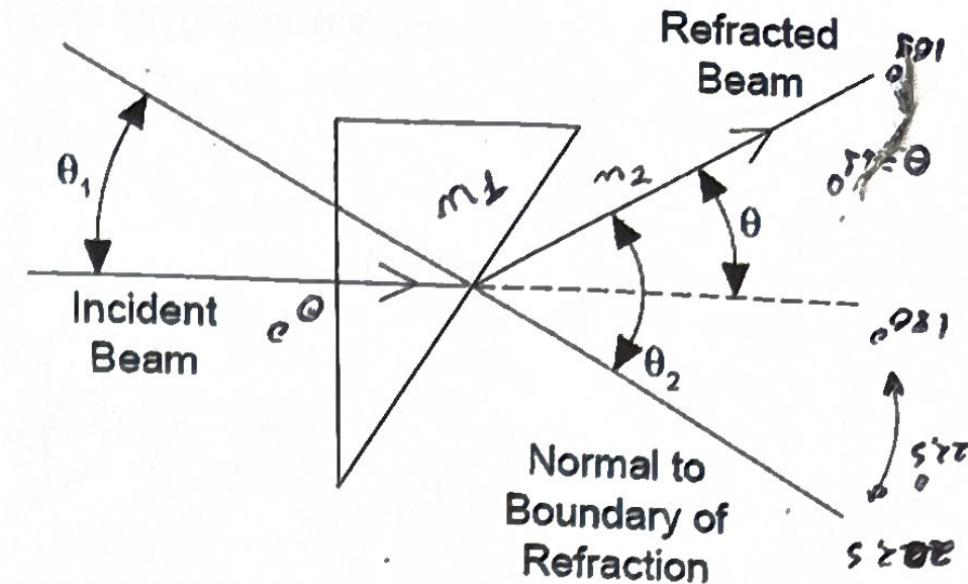


Figura 5: Ângulo de incidência e refração em microondas.

### **2.1.3 Fibra óptica**

Nesta seção será apresentada a montagem, equipamentos utilizados e procedimento de execução do experimento de fibra óptica. Aqui o objetivo é verificar a condução das ondas eletromagnéticas por meio de um tubo preenchido com grânulos de estireno.

#### **2.1.3.1 Montagem**

A montagem permanece a mesma dos estudos anteriores, com única diferença que, no lugar do anteparo, há um tubo de plástico dobrável, preenchido por grânulos de estireno, o qual conecta o transmissor ao receptor que desta vez estão desalinhados

#### **2.1.3.2 Equipamentos utilizados**

Para esta montagem foi utilizado o conjunto transmissor-goniômetro-receptor e um tubo plástico flexível preenchido com grânulos de estireno que cumpre o papel de fibra óptica, isto é, um meio condutor de ondas eletromagnéticas.

#### **2.1.3.3 Execução**

Para aferir a condução das microondas, o transmissor e receptor foram posicionados a 90º um em relação ao outro, de modo que não haveria interferência de ondas transmitidas pelo ar. Posicionando o tubo conectando os dois dispositivos verifica-se sinal lido no receptor, indicando que o tubo está funcionando como um meio condutor das ondas.

A partir disso, é interessante saber qual o ângulo máximo de flexão com o qual o tubo permanece conduzindo o feixe de microondas sem perda significativa de potência do sinal. Para tal, o tubo foi flexionado em ângulos crescentes, até que o sinal lido pelo receptor começou a cair significativamente.

### **2.1.4 Polarização**

Nesta seção será apresentada a montagem, equipamentos utilizados e procedimento de execução do experimento de polarização. Será verificado que ondas eletromagnéticas são transversais, com vetores do campo elétrico (E) e campo magnético (B) oscilando perpendicularmente à direção de propagação.

#### **2.1.4.1 Montagem**

Desta vez utiliza-se um anteparo vazado em formas retangulares paralelas entre si no eixo do goniômetro, este é o polarizador. Neste estudo serão utilizados 2 polarizadores alinhados no mesmo eixo, a figura 6 ilustra o esquema da montagem do experimento, onde o transmissor e receptor estão posicionados no goniômetro, com um polarizador entre eles. A figura 7 ilustra a onda atravessando o polarizador, mostrando o resultado esperado de uma onda polarizada linearmente.

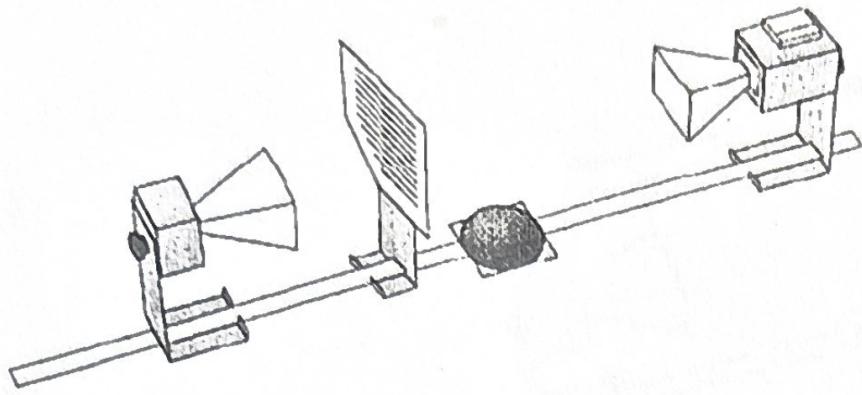


Figura 6: Esquema da montagem do experimento de polarização.

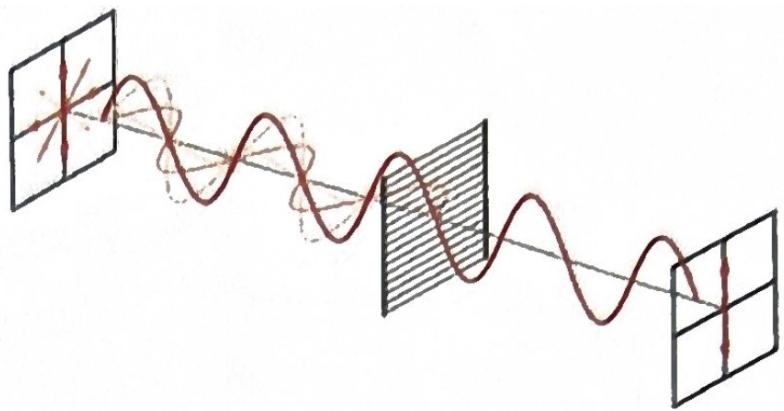


Figura 7: Onda atravessando o polarizador.

#### 2.1.4.2 Equipamentos utilizados

Além do conjunto transmissor-goniômetro-receptor, foram utilizados os 2 polarizadores metálicos, a figura 8 ilustra os polarizadores utilizados, onde é possível ver as aberturas retangulares paralelas entre si.

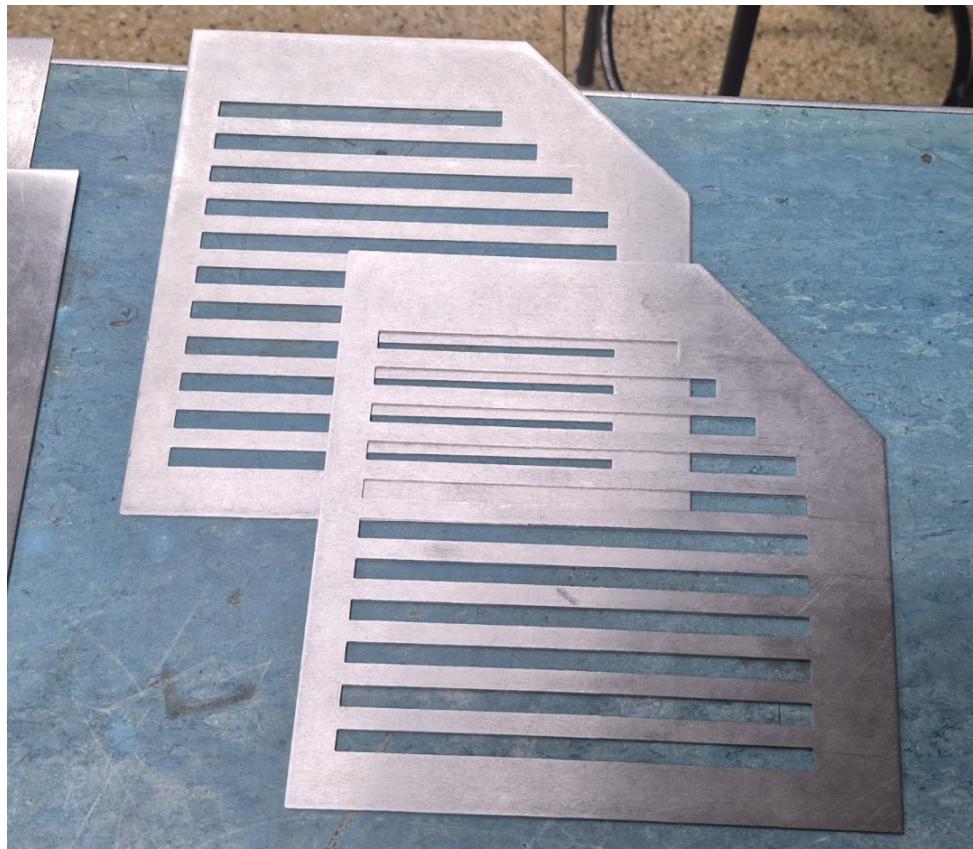


Figura 8: Filtros polarizadores.

#### 2.1.4.3 Execução

Iniciamente alinhamos o transmissor e receptor com zero graus de rotação entre eles, no mesmo eixo de polarização. A partir disso posicionamos o primeiro polarizador entre eles com suas fendas em zero graus e depois 90 graus, observando a variação do sinal lido pelo receptor. Em seguida o transmissor e o receptor foram realinhados com 90 graus de rotação entre eles e o segundo polarizador foi posicionado entre eles com suas fendas orientadas a 45 graus, registrando novamente a variação do sinal lido pelo receptor.

## 2.2 Seção II - Cálculo da frequência da fonte

Nesta seção será apresentada a montagem, equipamentos utilizados e procedimento de execução dos experimentos dos método 1 - medição da distância de máximos de intensidade e método 2 - medição da cavidade metálica e modos de propagação, ambos métodos para calcular a frequência da fonte.

### 2.2.1 Método 1 - Medição da distância de máximos de intensidade

Nesta seção será apresentada a montagem, equipamentos utilizados e procedimento de execução do experimento de medição da distância de pontos máximos de intensidade de radiação. A figura 9 ilustra o esquema da montagem do experimento.

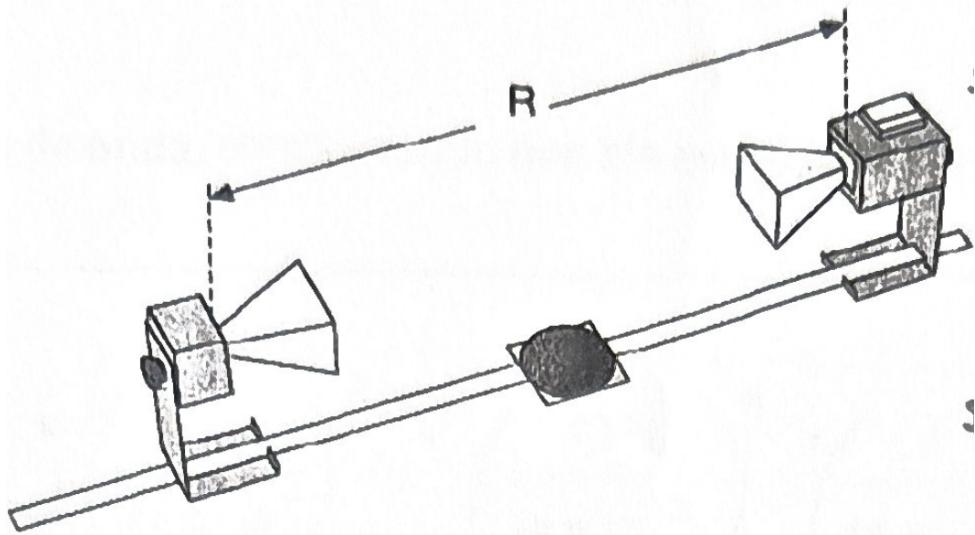


Figura 9: Esquema da montagem do experimento de medição da distância de máximos de intensidade.

#### 2.2.1.1 Montagem

O transmissor e receptor montados sobre o goniômetro, com alinhamento de 180 graus entre eles. A figura 10 ilustra a montagem do experimento, onde o transmissor e receptor estão posicionados no goniômetro, com o receptor afastado do transmissor, de forma que o receptor possa ser afastado gradativamente até encontrar os máximos de intensidade de radiação.

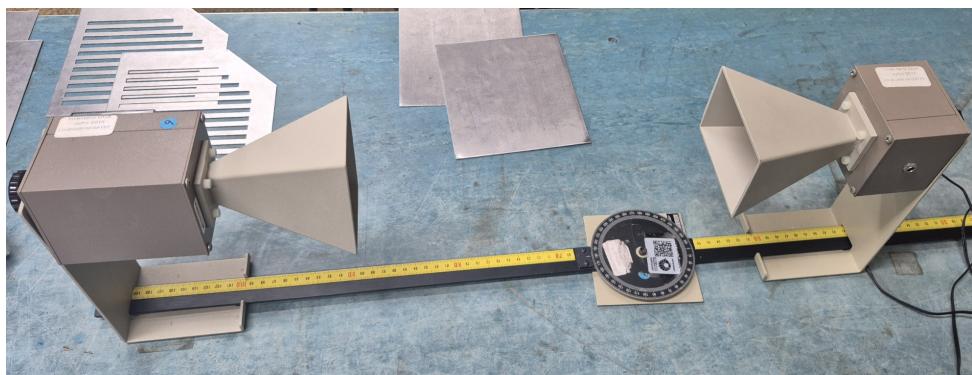


Figura 10: Montagem do experimento de medição da distância de máximos de intensidade.

#### 2.2.1.2 Equipamentos utilizados

Os equipamentos utilizados foram o transmissor, receptor e goniômetro

#### 2.2.1.3 Execução

Mantendo sempre o goniômetro medindo 180 graus entre transmissor e receptor, mantivemos o transmissor parado e afastamos o receptor gradativamente até encontrar um ponto onde o sinal alcançava o fundo de escala do receptor.

Tomamos nota da posição do primeiro máximo de intensidade de radiação encontrada, em seguida afastamos o receptor até encontrar o próximo máximo. Repetimos isso encontrando os máximos subsequentes até o fim da escala de distância do goniômetro. A figura 11 ilustra a zona de ressonância, onde os máximos de intensidade são encontrados ao variar a distância do receptor em relação ao transmissor.

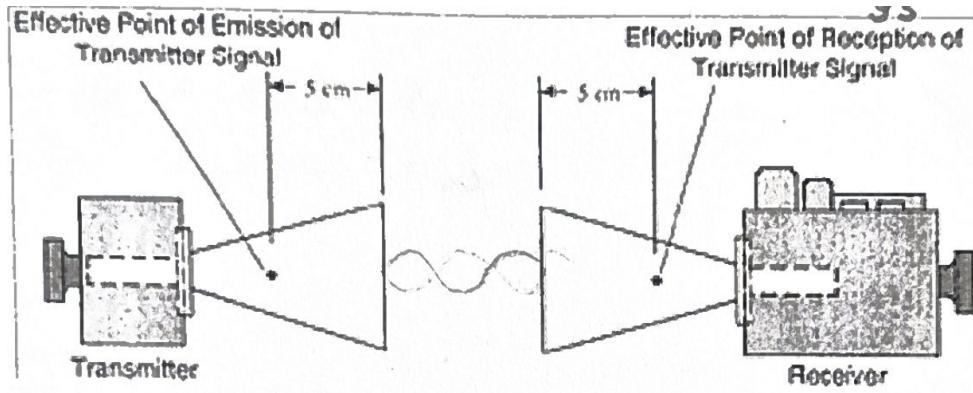


Figura 11: Zona de ressonância.

## 2.2.2 Método 2 - medição da cavidade metálica e modos de propagação

Nesta seção será apresentada a montagem, equipamentos utilizados e procedimento de execução do experimento de medição da cavidade metálica e modos de propagação.

### 2.2.2.1 Montagem

O equipamento montado consiste em uma parte interna do emissor desmontada. Para tal foi retirado 4 parafusos da lateral do emissor para termos acesso a cavidade ressonante metálica. A figura 12 ilustra a montagem do experimento, onde o transmissor está desmontado e o podemos ver a cavidade metálica resonante.

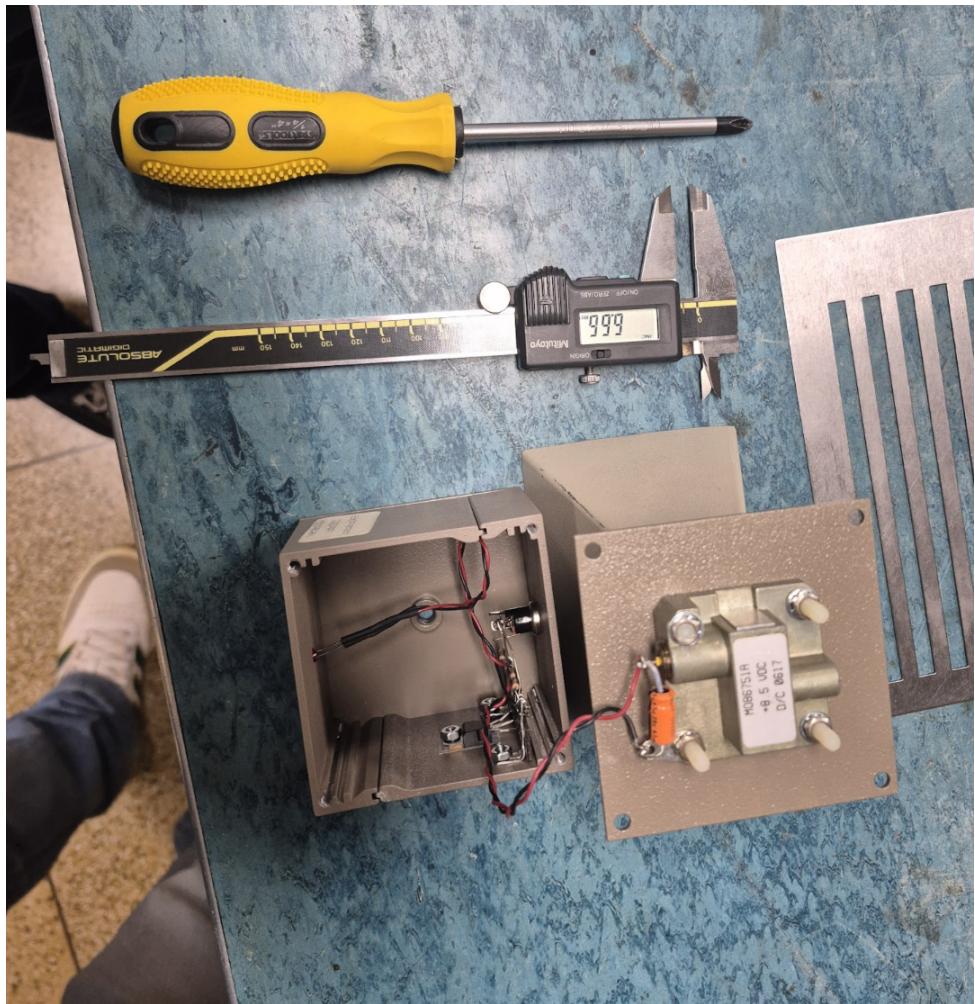


Figura 12: Montagem do experimento de medição da cavidade metálica e modos de propagação.

#### 2.2.2.2 Equipamentos utilizados

Os equipamentos utilizados foram o emissor microondas, chave phillips e paquímetro.

#### 2.2.2.3 Execução

Com o receptor em mãos, foi retirado 4 parafusos laterais do mesmo com uma chave philips, permitindo acesso a cavidade ressonante metálica. Esta cavidade teve as dimensões de largura, comprimento e profundidade medidas com um paquímetro. A figura 13 ilustra a cavidade metálica ressonante, onde as cotas P, C e L são, respectivamente, profundidade, comprimento e largura da cavidade.



Figura 13: Cavidade metálica ressonante. As cotas P, C e L são, respectivamente, profundidade, comprimento e largura da cavidade.

### 2.2.3 Seção III - Caracterização da antena

Nesta seção será apresentada a montagem, equipamentos utilizados e procedimento de execução do experimento de caracterização da antena.

#### 2.2.3.1 Montagem

Nesta seção serão usadas duas montagens semelhantes, ambas com o transmissor e receptor montados sobre o goniômetro com ângulo ajustável e distância fixa. Na primeira montagem onde faremos a varredura sob o plano E, antena e receptor ficarão alinhados com zero graus de rotação entre si, já na segunda montagem onde haverá varredura sobre o plano H os dois ficarão alinhados com 90 graus de rotação entre si.

#### 2.2.3.2 Equipamentos utilizados

Os equipamentos utilizados serão receptor, emissor e goniômetro.

#### 2.2.3.3 Execução

Mantendo receptor e emissor fixos na escala de distância entre eles e movendo apenas de modo angular, iniciamos uma varredura no plano E, com receptor e emissor alinhados com zero graus de rotação entre eles. O ponto de partida se dá na escala de zero graus do goniômetro, ajustamos a escala do receptor para receber a máxima intensidade neste ponto (fundo de escala) e iniciamos a varredura do plano E movimentando 90 graus para

a direita, retomando ao ponto de zero graus, e por fim movimentando 90 graus para a esquerda. Ambas as varreduras foram feitas com incrementos de 5 graus.

Para realizar a varredura no plano H o receptor foi rotacionado 90 graus em relação ao emissor e o processo descrito acima foi realizado novamente.

## 3 Resultados

Nos capítulos abaixo seguem as discussões dos resultados de cada seção do experimento.

### 3.1 Seção I - Demonstração de Propriedades (de Ondas Eletromagnéticas)

Nesta seção serão apresentados os resultados dos experimentos de reflexão, refração, condução em fibra óptica e polarização de microondas.

#### 3.1.1 Reflexão

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados do experimento de reflexão.

##### 3.1.1.1 Apresentação de dados

Conforme registrado na Tabela 1 do relatório, os ângulos de reflexão ( $\theta_r$ ) foram medidos para quatro valores de incidência ( $\theta_i$ ) utilizando anteparo metálico e goniômetro:

- $\theta_i = 40^\circ \rightarrow \theta_r = 40^\circ$
- $\theta_i = 50^\circ \rightarrow \theta_r = 50^\circ$
- $\theta_i = 60^\circ \rightarrow \theta_r = 58^\circ$
- $\theta_i = 70^\circ \rightarrow \theta_r = 67^\circ$

##### 3.1.1.2 Análise dos resultados

A lei da reflexão ( $\theta_i = \theta_r$ ) foi validada para ângulos até  $50^\circ$ , conforme demonstrado pelo alinhamento quase perfeito entre incidência e reflexão nas duas primeiras medições. As discrepâncias observadas em  $60^\circ$  e  $70^\circ$  (diferenças de  $2^\circ$  e  $3^\circ$ ) são atribuíveis a limitações experimentais intrínsecas ao arranjo. O posicionamento angular do receptor para detecção do sinal máximo pode ter sido afetado por difração nas bordas do anteparo metálico, fenômeno mais pronunciado em ângulos rasos onde o comprimento de onda ( $\lambda \approx 2.85$  cm) interage com irregularidades microscópicas da superfície. Este comportamento é consistente com as previsões de Kraus (1991) sobre dispersão angular em superfícies não ideais, reforçando que microondas obedecem aos princípios fundamentais da óptica geométrica, mesmo em frequências de GHz.

#### 3.1.2 Refração

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados do experimento de refração.

### **3.1.2.1 Apresentação de dados**

No experimento com o prisma de estireno, o ângulo de refração que maximizou a intensidade do sinal no receptor foi  $\theta_r = 11^\circ$ . Este valor foi obtido ajustando-se iterativamente o goniômetro até atingir a leitura de pico no detector, conforme ilustrado na Figura 5 do relatório.

### **3.1.2.2 Análise dos resultados**

O desvio mensurável do feixe ( $\theta_r = 11^\circ$ ) confirma a redução da velocidade de fase no interior do dielétrico. A detecção do sinal máximo nesse ângulo específico valida a lei de Snell para microondas, demonstrando que a relação  $n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_r$  mantém-se aplicável mesmo em materiais granulares como o estireno. A imprecisão na determinação de  $\theta_i$  (não registrada numericamente) limita o cálculo exato do índice de refração ( $n$ ), porém a existência do desvio comprova que  $n_{\text{estireno}} > n_{\text{ar}}$ . Como destacado por Reitz et al. (1980), este fenômeno é uma consequência direta da interação entre o campo elétrico da onda e os dipolos elétricos induzidos no dielétrico, que retardam a propagação. O resultado corrobora a universalidade da refração em todo o espectro eletromagnético.

### **3.1.3 Fibra óptica**

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados do experimento de condução em fibra óptica.

#### **3.1.3.1 Apresentação de dados**

O tubo flexível com grânulos de estireno conduziu microondas entre transmissor e receptor inicialmente desalinhados a  $90^\circ$ . O ângulo crítico de flexão, além do qual o sinal decaiu significativamente, foi determinado experimentalmente como  $\theta_c = 64^\circ$ .

#### **3.1.3.2 Análise dos resultados**

A condução eficiente até  $\theta_c = 64^\circ$  é uma evidência empírica do ângulo crítico para reflexão interna total. Neste experimento, as microondas são confinadas no tubo porque incidem nas interfaces ar-estireno com ângulos inferiores a  $\theta_c$ , sofrendo reflexões sucessivas. A perda abrupta de sinal acima de  $64^\circ$  ocorre quando a incidência ultrapassa  $\theta_c = \arcsin(1/n)$ , permitindo que parte da energia seja refratada para o exterior. Este valor está alinhado com o índice de refração estimado do estireno ( $n \approx 1.1$ ), pois  $\arcsin(1/1.1) \approx 65^\circ$ , dentro da margem de erro experimental. Como enfatizado por Feynman (1964), o fenômeno é idêntico ao das fibras ópticas, onde o confinamento depende exclusivamente do contraste de índices de refração e da geometria do guia.

### **3.1.4 Polarização**

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados do experimento de polarização.

#### **3.1.4.1 Apresentação de dados**

Utilizando dois polarizadores metálicos com fendas paralelas, observou-se:

1. Sinal máximo com polarizadores paralelos ( $\alpha = 0^\circ$ ).
2. Sinal nulo com polarizadores cruzados ( $\alpha = 90^\circ$ ).
3. Sinal residual com polarizador intermediário a  $45^\circ$ .

#### 3.1.4.2 Análise dos resultados

A extinção completa do sinal a  $90^\circ$  comprova que as microondas emitidas são polarizadas linearmente. O cancelamento ocorre porque as fendas do segundo polarizador são ortogonais à direção do campo elétrico ( $\vec{E}$ ) transmitido pelo primeiro, bloqueando totalmente a passagem da onda. O sinal detectado a  $45^\circ$  corresponde exatamente à projeção de  $\vec{E}$  na direção das fendas ( $I = I_0 \cos^2 45^\circ = 0.5I_0$ ), validando a lei de Malus. Conforme descrito por Kraus (1991), este comportamento é uma assinatura inequívoca da natureza transversal das ondas eletromagnéticas, onde a energia é transferida perpendicularmente à direção de propagação. O experimento demonstra que mesmo em microondas, a polarização é um fenômeno puramente vetorial, controlável por elementos físicos de simetria definida.

## 3.2 Seção II - Cálculo de Frequência de Fonte

Nesta seção serão apresentados os resultados dos experimentos dos métodos 1 - medição da distância de máximos de intensidade e método 2 - medição da cavidade metálica e modos de propagação, ambos métodos para calcular a frequência da fonte.

### 3.2.1 Método 1 - Medição da distância de máximos de intensidade

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados do experimento de medição da distância de máximos de intensidade de radiação.

#### 3.2.1.1 Apresentação de dados

A tabela 2 apresenta os dados coletados durante o experimento de medição da distância de máximos de intensidade: tabela de 3 colunas abaixo

# o máximo	Posição (cm)	$\Delta dx$ (cm)
1	51	0
2	50	1
3	48.5	1.5
4	46.8	1.7
5	45.2	1.6
6	43.9	1.3

Tabela 2: Dados coletados durante o experimento de medição da distância de máximos de intensidade.

#### 3.2.1.2 Análise dos resultados

Sabendo que dois máximos consecutivos representam duas cristas de onda que estão a metade do comprimento de onda de distância uma da outra, podemos calcular o comprimento de onda  $\lambda$  a partir da distância entre os máximos consecutivos, que é dada por

$\Delta dx$  na tabela 2. A média dos valores de  $\Delta dx$  é

$$\Delta dx = \frac{1 + 1.5 + 1.7 + 1.6 + 1.3}{5} = 1.42\text{cm} \quad (1)$$

Assim, a frequência da fonte pode ser calculada a partir da velocidade da luz  $c$  e do comprimento de onda  $\lambda$ :

$$f = \frac{c}{2(\frac{\lambda}{2})} = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 1.42 \times 10^{-2}} = 10.4896\text{GHz} \quad (2)$$

O valor encontrado para a frequência da fonte é de 10.4896 GHz, que está próximo do valor especificado de 10.525 GHz, com uma diferença de aproximadamente 0.33 %.

### 3.2.2 Método 2 - Medição da cavidade metálica e modos de propagação

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados do experimento de medição da cavidade metálica e modos de propagação.

#### 3.2.2.1 Apresentação de dados

Os dados coletados durante o experimento de medição da cavidade metálica são as dimensões da cavidade, que foram medidas com um paquímetro e são apresentadas na tabela 3 abaixo:

Dimensão	Valor (mm)
Profundidade (P)	14.18
Comprimento (C)	29.92
Largura (L)	16.61

Tabela 3: Dados coletados durante o experimento de medição da cavidade metálica.

#### 3.2.2.2 Análise dos resultados

Com as dimensões da cavidade metálica, podemos calcular a frequência da fonte utilizando a fórmula para o modo dominante de propagação em uma cavidade retangular, que é dada por:

$$f_{nmp} = \frac{c}{2\sqrt{\left(\frac{m}{L}\right)^2 + \left(\frac{n}{C}\right)^2 + \left(\frac{p}{P}\right)^2}} \quad (3)$$

onde  $m$ ,  $n$  e  $p$  são os modos de propagação, que para o modo dominante são  $m = 1$ ,  $n = 0$  e  $p = 1$ . Substituindo os valores medidos na tabela 3 e considerando a velocidade da luz  $c = 3 \times 10^8$  m/s, temos:

$$f_{nmp} = \frac{3 \times 10^8}{2\sqrt{\left(\frac{1}{16.61 \times 10^{-3}}\right)^2 + \left(\frac{0}{29.92 \times 10^{-3}}\right)^2 + \left(\frac{1}{14.18 \times 10^{-3}}\right)^2}} = 10.3\text{GHz} \quad (4)$$

O valor encontrado para a frequência da fonte é de 10.3 GHz, que está próximo do valor especificado de 10.525 GHz, com uma diferença de aproximadamente 2.14 %.

### 3.3 Seção III - Caracterização da antena

Nesta seção serão apresentados os resultados do experimento de caracterização da antena, onde foram realizadas varreduras no plano E e plano H.

#### 3.3.1 Apresentação de dados

A tabela 4 apresenta os dados coletados durante o experimento de caracterização da antena no plano H, enquanto a tabela 5 apresenta os dados coletados durante o experimento de caracterização da antena no plano E, onde foram registradas as leituras do receptor em função do ângulo de rotação do goniômetro:

Ângulo (graus)	Receptor (mA)	Ângulo (graus)	Receptor (mA)
0	1.0	5	0.99
10	0.9	15	0.8
20	0.65	25	0.5
30	0.3	35	0.15
40	0.1	45	0

Tabela 4: Dados coletados durante o experimento de caracterização da antena no plano H.

Ângulo (graus)	Receptor (mA)	Ângulo (graus)	Receptor (mA)
0	1.0	5	0.9
10	0.7	15	0.55
20	0.4	25	0.1
30	0	35	0
40	0	45	0

Tabela 5: Dados coletados durante o experimento de caracterização da antena no plano E.

#### 3.3.2 Análise dos resultados

Os dados coletados foram plotados em gráficos, onde os eixos radiais representam o ângulo de rotação do goniômetro e os eixos circunferenciais representam a leitura do receptor, variando de 0 a 1.0 mA, que é o valor máximo lido pelo receptor. Os gráficos das figuras 15 e 14 abaixo mostram os padrões de radiação da antena nos planos H e E, respectivamente.

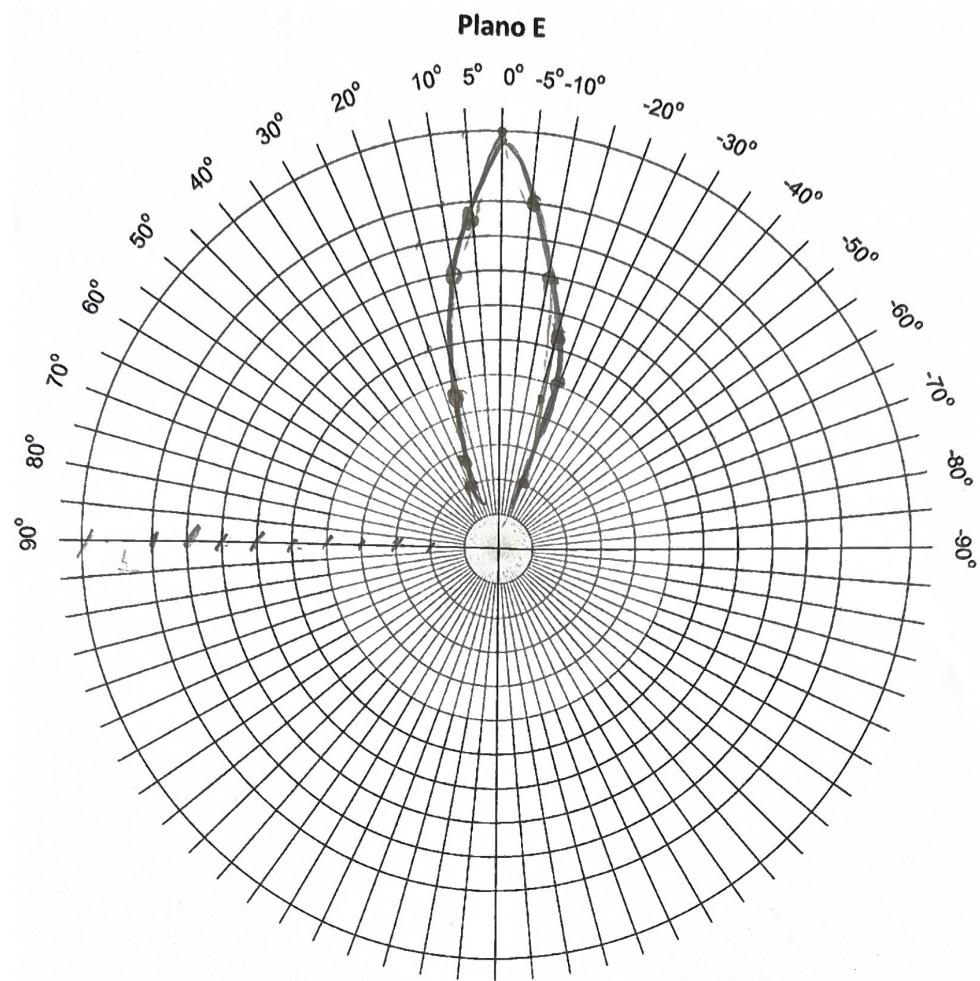


Figura 14: Padrão de radiação da antena no plano E.

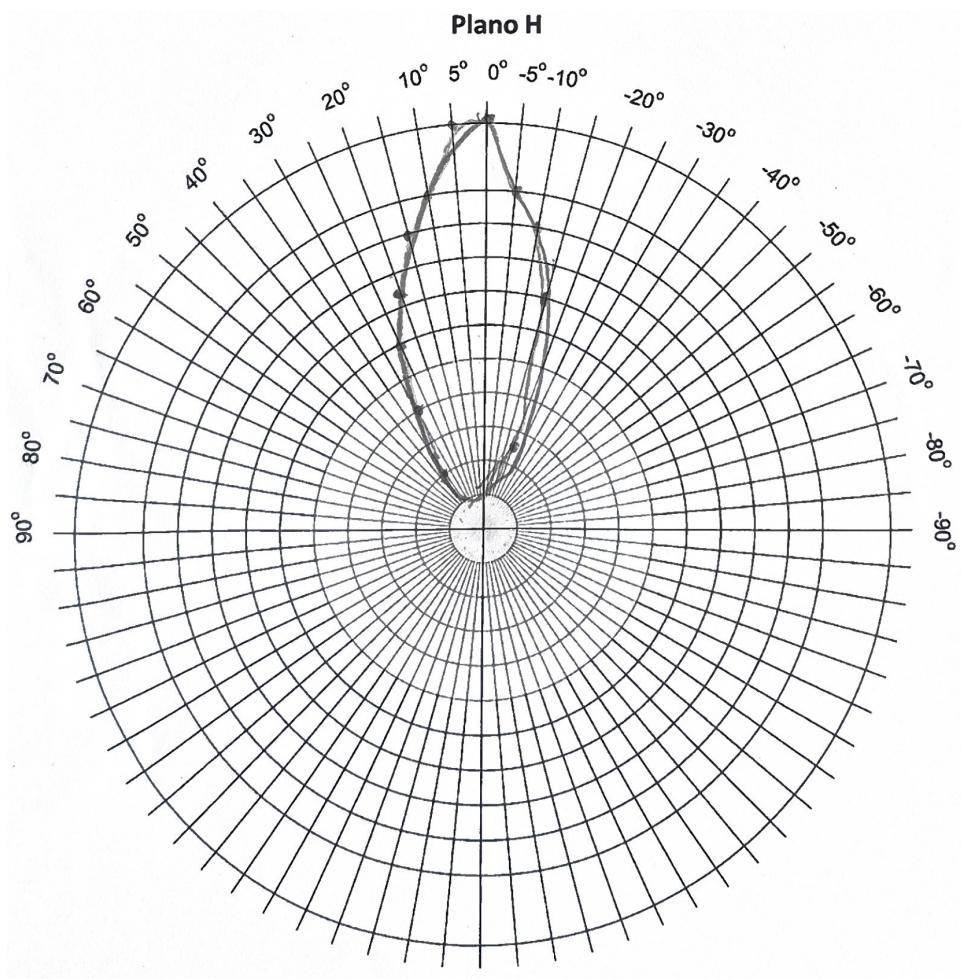


Figura 15: Padrão de radiação da antena no plano H.

## 4 Conclusão

Neste experimento como um todo, foram presenciadas as propriedades das ondas eletromagnéticas na faixa de micro-ondas, por meio de uma abordagem experimental sistemática envolvendo os estudos da reflexão, refração, guiamento e polarização de ondas eletromagnéticas, bem como o estudo de receptores e emissores de ondas eletromagnéticas, no caso, de microondas.

Na **Seção I**, validaram-se as leis da óptica geométrica aplicadas às micro-ondas. A reflexão apresentou boa concordância com a teoria ( $\theta_i \approx \theta_r$ ), evidenciando o comportamento espelhado das micro-ondas mesmo diante de pequenas imperfeições no anteparo metálico.

No estudo da refração, observada com o uso de um prisma preenchido com estireno, demonstrou a aplicabilidade da Lei de Snell, o que de fato, é viável da dedução intuitiva, uma vez que, dentro do espectro visível, é fácil de entender o fenômeno ocorrendo em um meio onde há uma fonte de luz e um prisma, e, sejam do espectro visível ou não, as ondas eletromagnéticas se comportam da mesma maneira, sendo aplicável então o conceito de refração da mesma forma.

Na análise com fibra óptica adaptada pelo uso do tubo plástico, a observação do guiamento do sinal até o receptor reforçou a aplicabilidade princípio da reflexão interna total, fundamental para guias de onda e sistemas de comunicação óptica.

Por fim, o experimento de polarização evidenciou o caráter vetorial das ondas eletromagnéticas, com a Lei de Malus sendo observada de maneira precisa ao se utilizar filtros em diferentes orientações.

Na **Seção II**, a frequência da fonte emissora foi determinada por dois métodos independentes. O primeiro método, baseado na distância entre máximos consecutivos de intensidade, resultou em uma frequência estimada de 10,49 GHz, com erro inferior a 0,5% em relação ao valor nominal de 10,525 GHz. Já o segundo método, baseado nas dimensões da cavidade metálica e nos modos de propagação ressonantes, levou a uma estimativa de 10,3 GHz, com erro inferior a 2,2%. Ambos os métodos demonstraram boa precisão e reafirmaram os fundamentos teóricos da propagação em cavidades e interferência.

Na **Seção III**, foi realizada a caracterização do padrão de radiação da antena nos planos E e H, isto é, basicamente "enxergar" a propagação destas ondas, como se tivessem dentro do espectro visível ao olho humano. Os dados experimentais permitiram traçar diagramas polares que evidenciam a direcionalidade do feixe irradiado, com máxima intensidade no eixo de emissão e atenuações progressivas conforme o ângulo se afasta da normal. A forma dos lobos de radiação obtidos está em acordo com o comportamento esperado para antenas do tipo horn, frequentemente utilizadas em experimentos com micro-ondas.

Em síntese, o experimento demonstrou de forma clara a aplicabilidade de conceitos fundamentais do eletromagnetismo à faixa de micro-ondas, oferecendo uma visão prática das leis físicas que regem a propagação, reflexão, refração e polarização de ondas, além de reforçar a importância da caracterização precisa de fontes e antenas em sistemas de telecomunicação.

## Referências

- [1] KRAUS, J.D. Eletromagnetics. 4th ed. McGraw-Hill, 1991.
- [2] REITZ, J.R., MILFORD, F.J. & CHRISTY, R.W. Foundations of Electromagnetic Theory. 3rd Addison-Wesley, 1980.
- [3] Feynman, R.P., Leighton, R.B., Sand, M. The Feynman Lectures on Physics, Volume II – mainly electromagnetism and matter. Disponível em: [https://www.feynmanlectures.caltech.edu/II\\_toc.html](https://www.feynmanlectures.caltech.edu/II_toc.html). Acesso em: 13 jun. 2025.