

# 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:

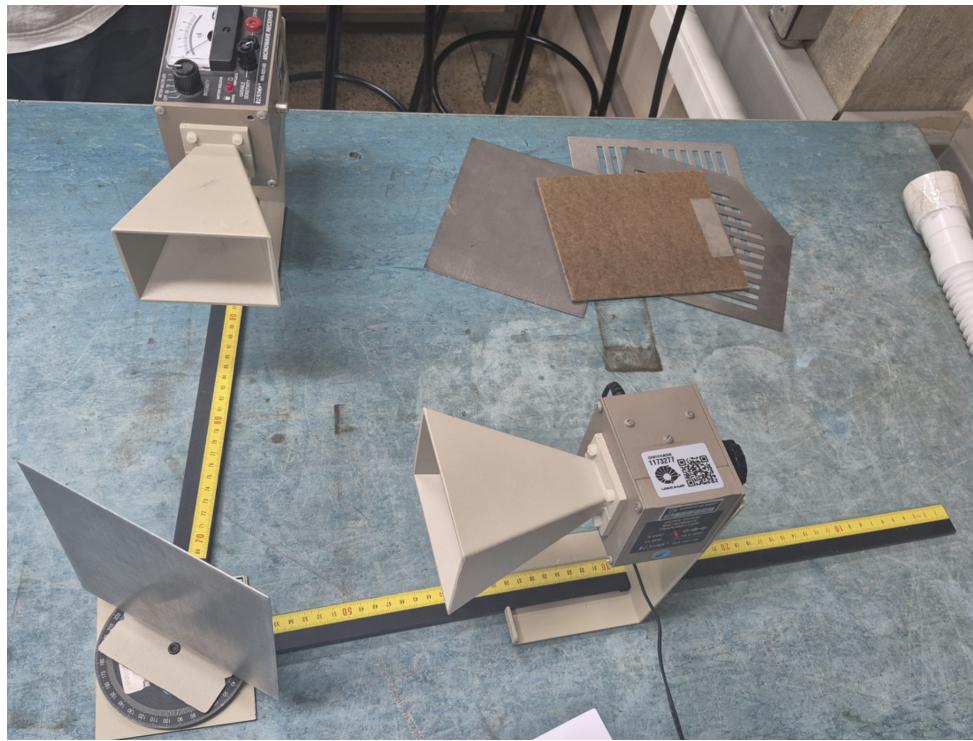


Figura 1: Montagem do experimento de reflexão de microondas.

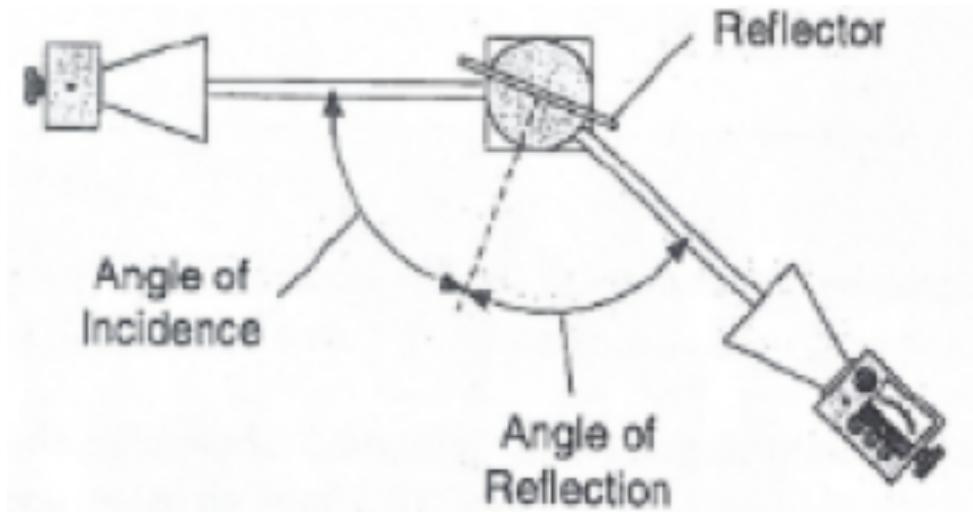


Figura 2: Ângulo de incidência e reflexão em microondas.

#### 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.

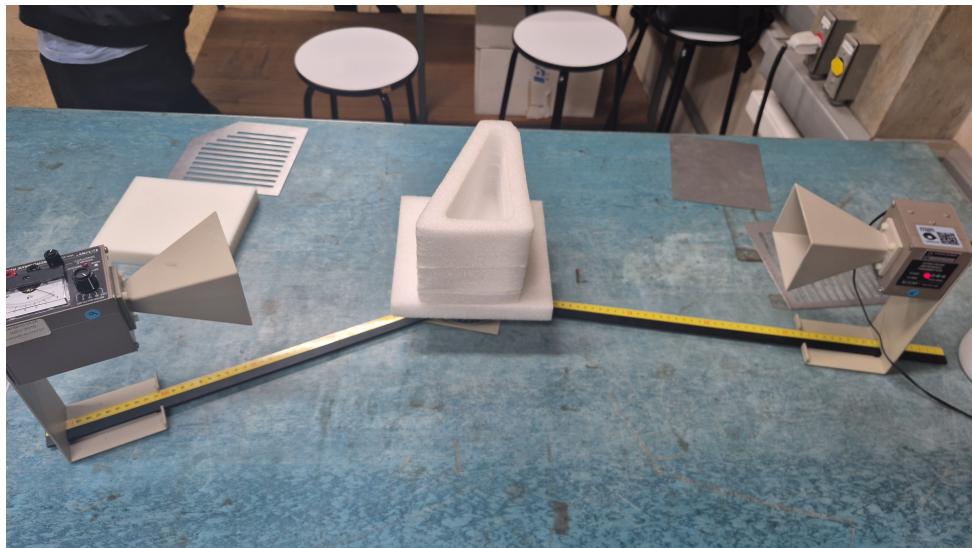


Figura 3: Ângulo de incidência e refração em microondas.

### 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.

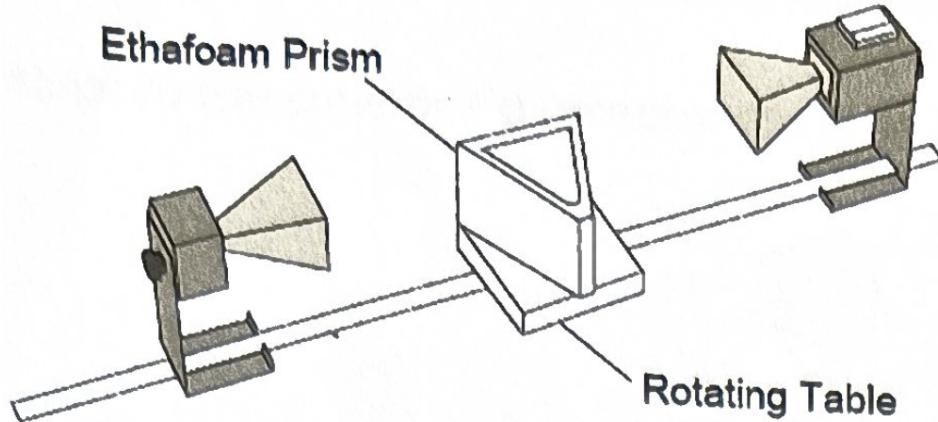


Figura 4: Esquema da montagem do experimento de refração de microondas.

### 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:

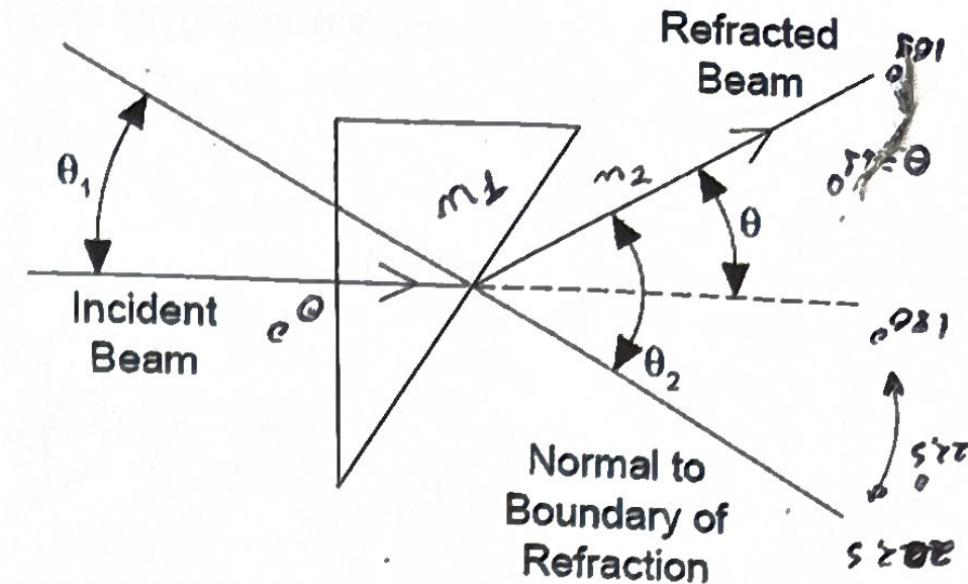


Figura 5: Ângulo de incidência e refração em microondas.

### **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.

### **2.1.4 Polarização**

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

#### **2.1.4.1 Montagem**

#### **2.1.4.2 Equipamentos utilizados**

#### **2.1.4.3 Execução**

## **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 6 ilustra o esquema da montagem do experimento.

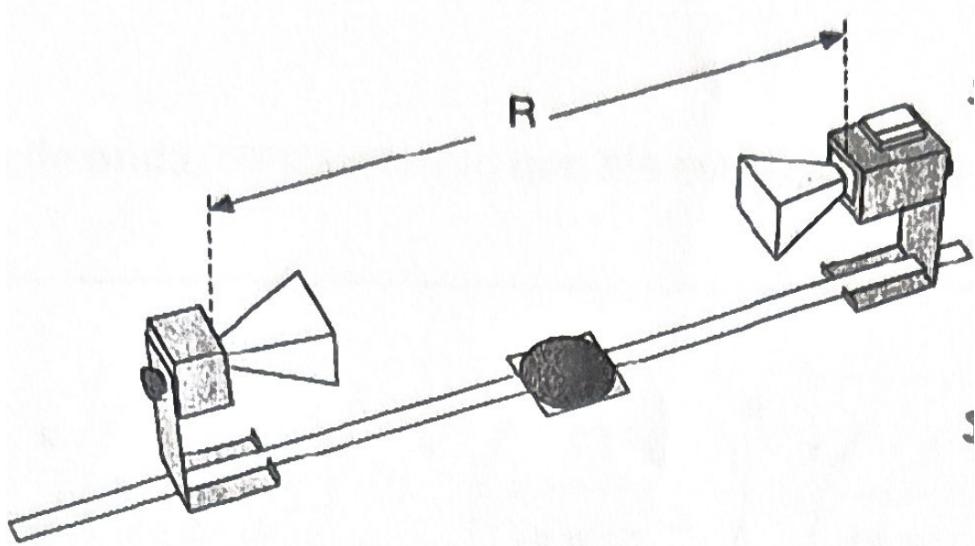


Figura 6: Esquema da montagem do experimento de medição da distância de máximos de intensidade.

#### 2.2.1.1 Montagem

O transmissor e receptor montados sobre o goniômetro, com alinhamento de 180 graus entre eles. A figura 7 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.

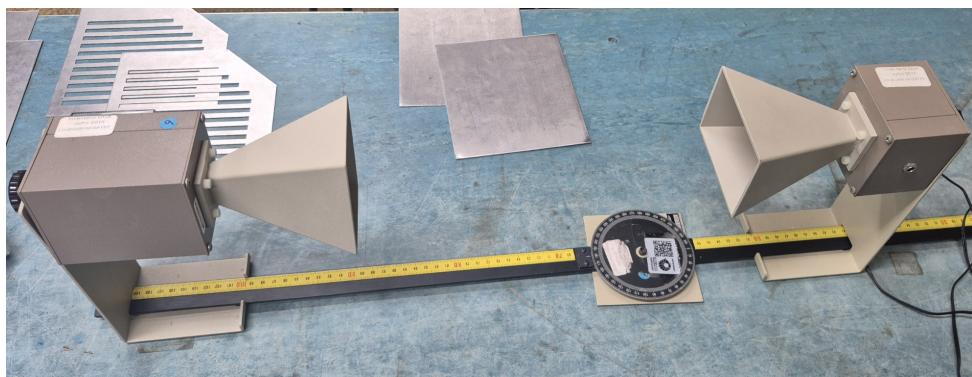


Figura 7: Montagem do experimento de medição da distância de máximos de intensidade.

#### 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 8 ilustra a zona de ressonância, onde os máximos de intensidade são encontrados ao variar a distância do receptor em relação ao transmissor.

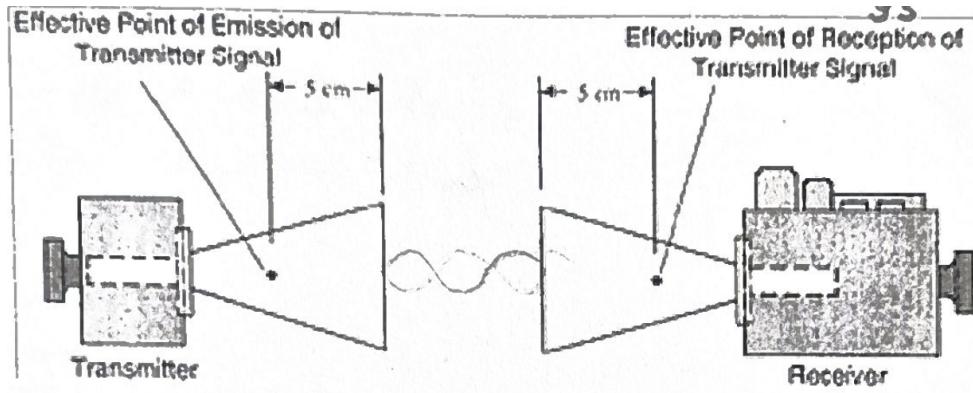


Figura 8: Zona de ressonância.

## 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 9 ilustra a montagem do experimento, onde o transmissor está desmontado e o podemos ver a cavidade metálica resonante.

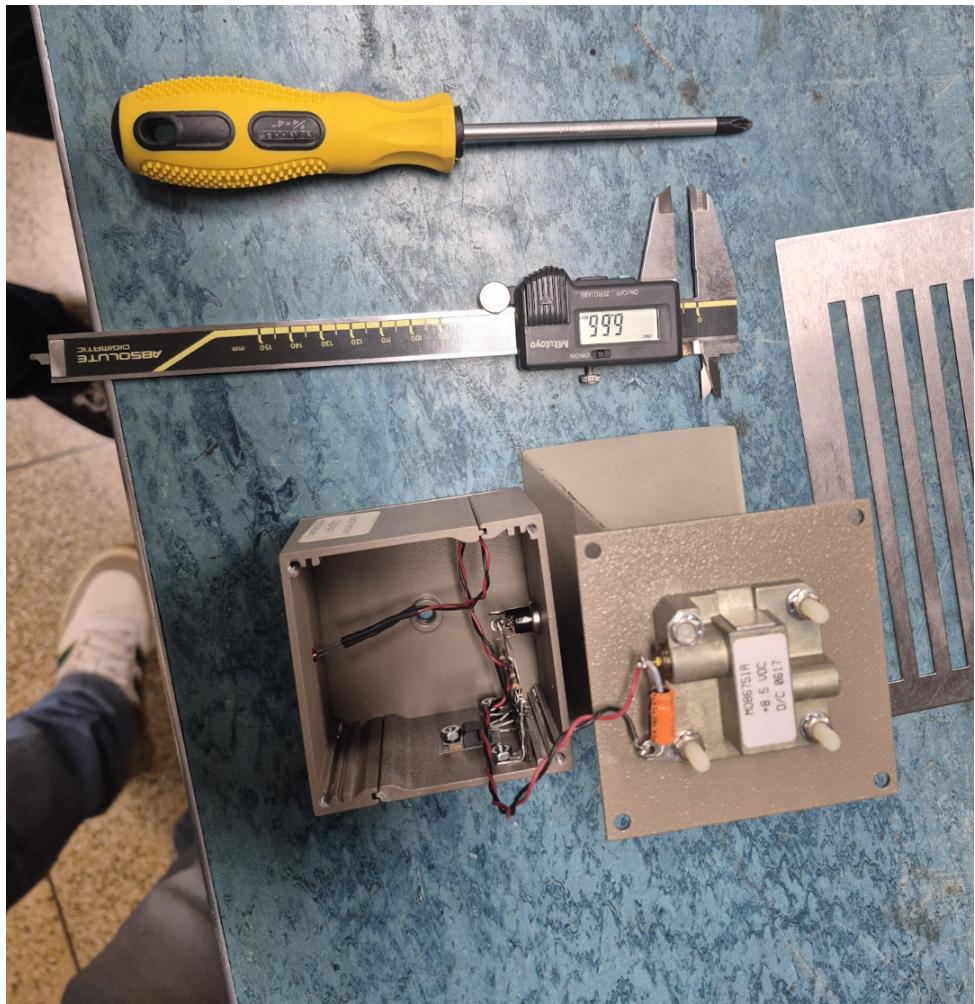


Figura 9: Montagem do experimento de medição da cavidade metálica e modos de propagação.

#### 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 10 ilustra a cavidade metálica ressonante, onde as cotas P, C e L são, respectivamente, profundidade, comprimento e largura da cavidade.



Figura 10: 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)

##### 3.1.1 Reflexão

###### 3.1.1.1 Apresentação de dados

###### 3.1.1.2 Análise dos resultados

##### 3.1.2 Refração

###### 3.1.2.1 Apresentação de dados

###### 3.1.2.2 Análise dos resultados

##### 3.1.3 Fibra óptica

###### 3.1.3.1 Apresentação de dados

###### 3.1.3.2 Análise dos resultados

##### 3.1.4 Polarização

###### 3.1.4.1 Apresentação de dados

###### 3.1.4.2 Análise dos resultados

#### 3.2 Seção II - Cálculo de Frequência de Fonte

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

###### 3.2.1.1 Apresentação de dados

###### 3.2.1.2 Análise dos resultados

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

###### 3.2.2.1 Apresentação de dados

###### 3.2.2.2 Análise dos resultados

#### 3.3 Seção III - Caracterização da antena

##### 3.3.1 Apresentação de dados

##### 3.3.2 Análise dos resultados

## 4 Conclusão

## 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.