

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:

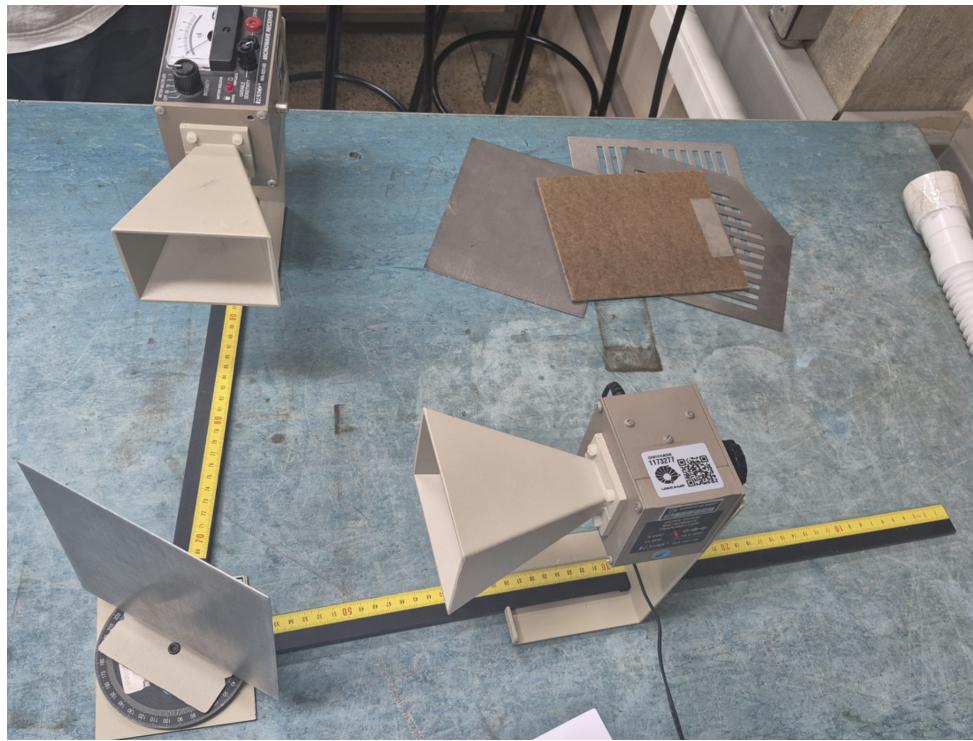


Figura 1: Montagem do experimento de reflexão de microondas.

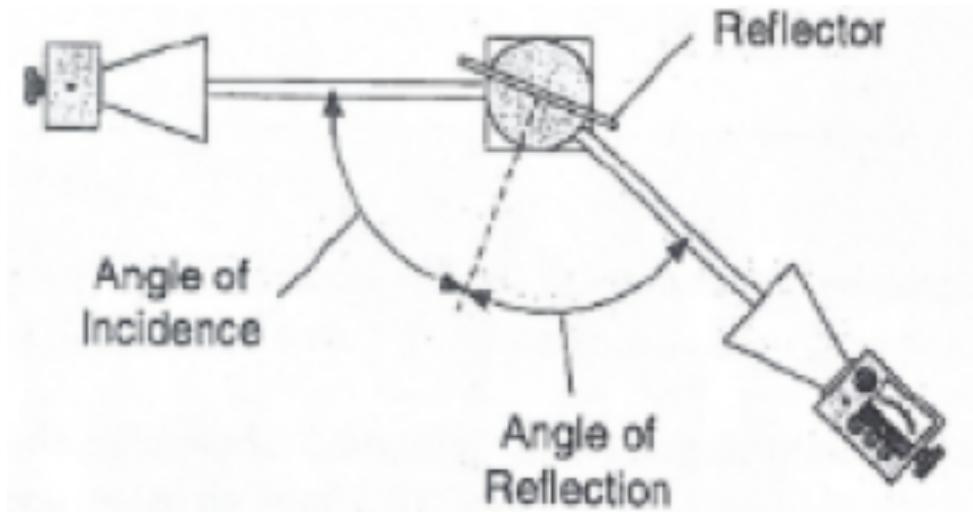


Figura 2: Ângulo de incidência e reflexão em microondas.

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 θ_i é igual ao ângulo de reflexão θ_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 (θ_i)	Ângulo de reflexão (θ_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.

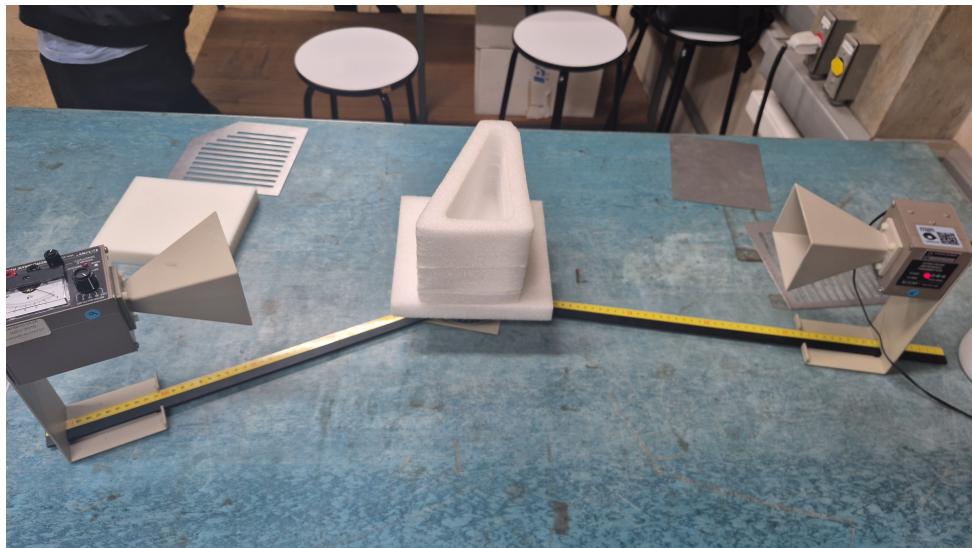


Figura 3: Ângulo de incidência e refração em microondas.

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.

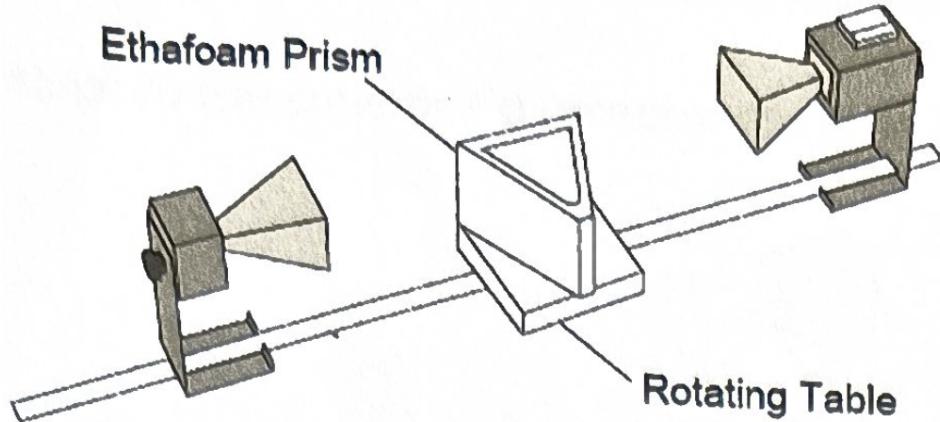


Figura 4: Esquema da montagem do experimento de refração de microondas.

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:

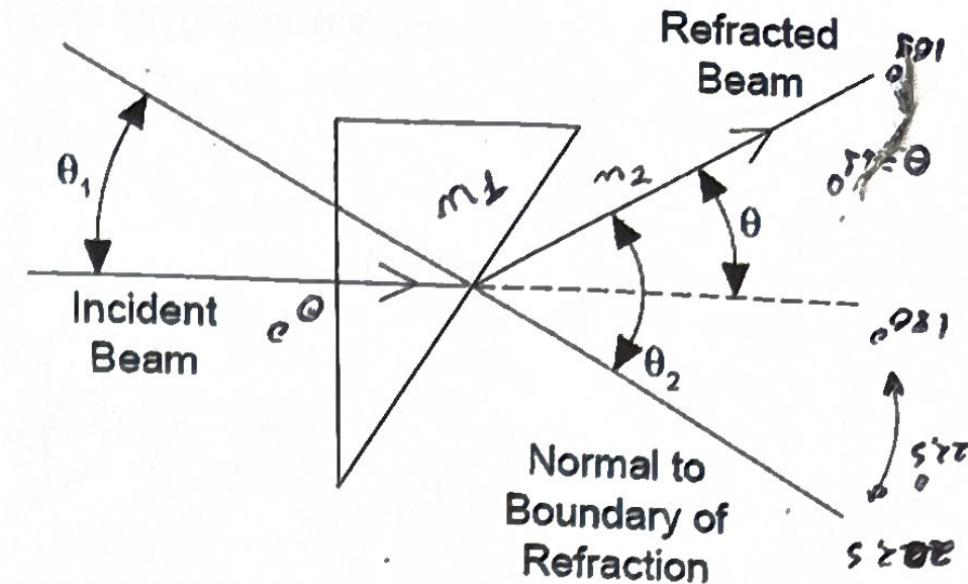


Figura 5: Ângulo de incidência e refração em microondas.

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.

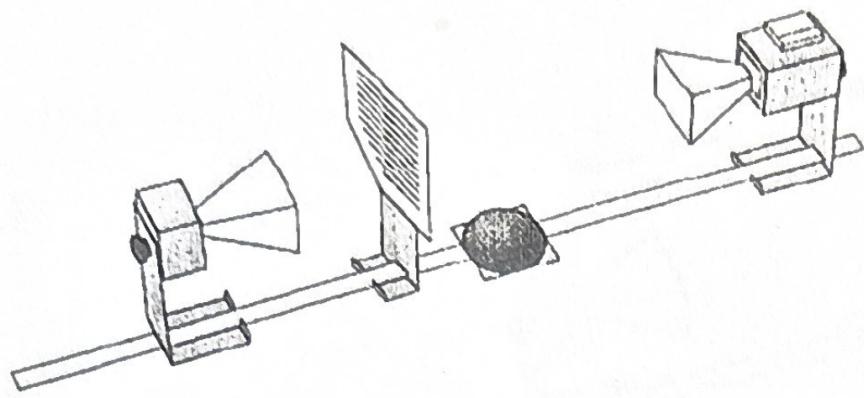


Figura 6: Esquema da montagem do experimento de polarização.

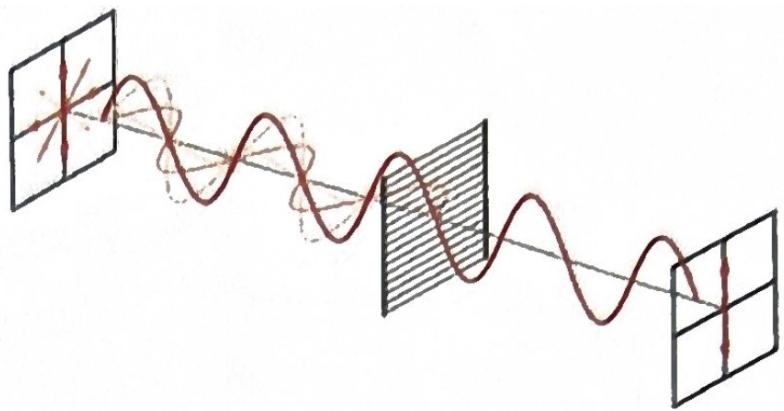


Figura 7: Onda atravessando o polarizador.

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.

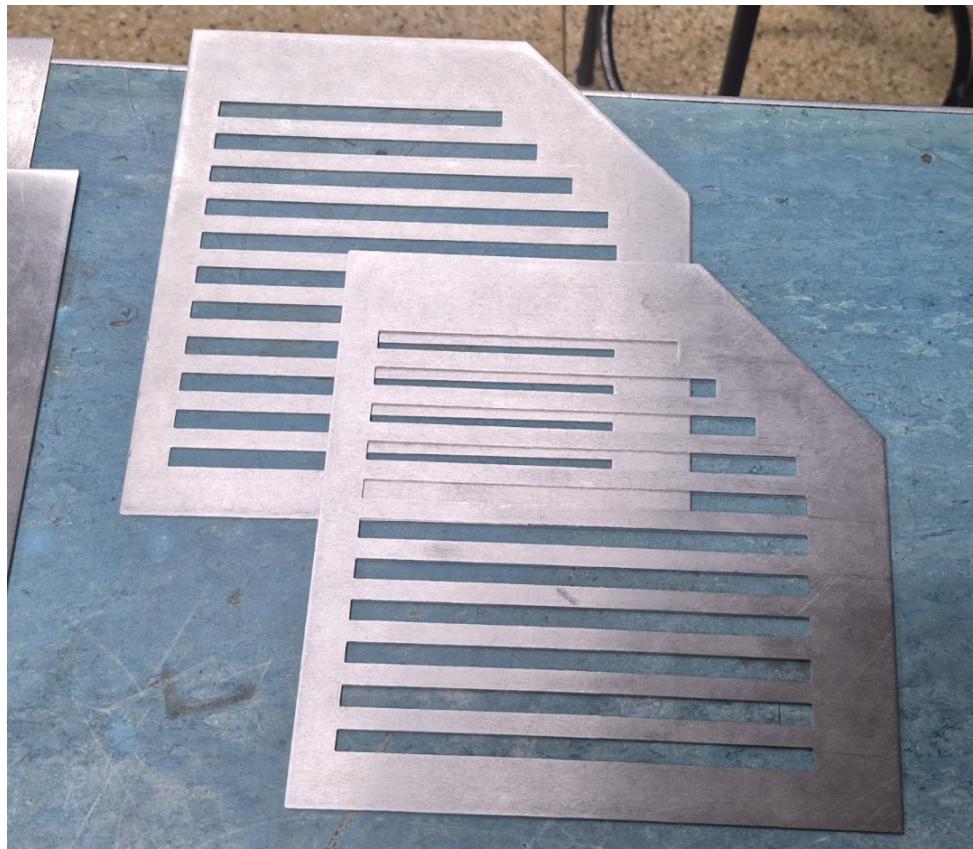


Figura 8: Filtros polarizadores.

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.

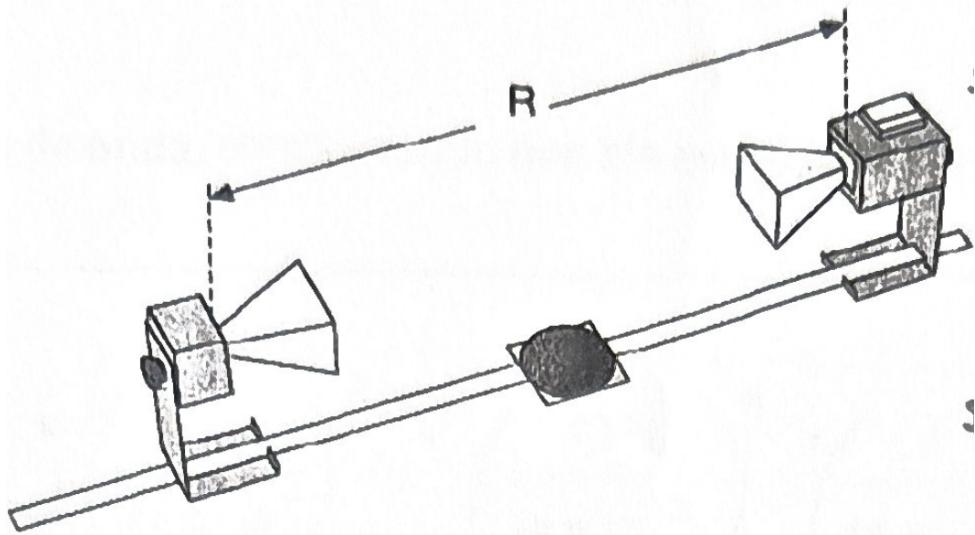


Figura 9: Esquema da montagem do experimento de medição da distância de máximos de intensidade.

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.

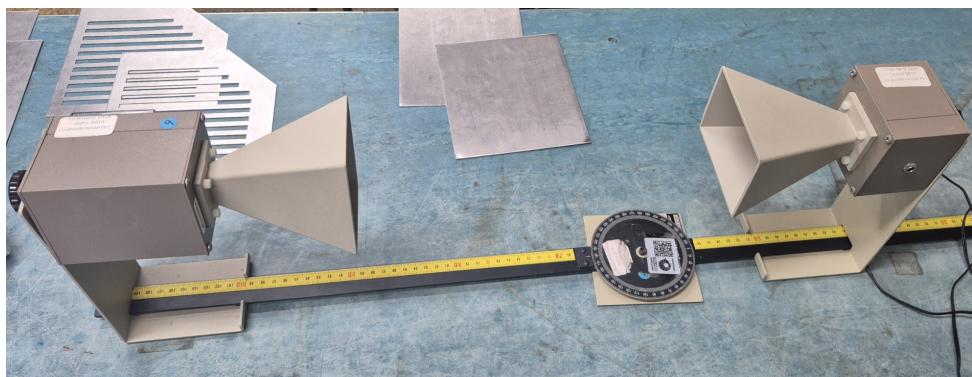


Figura 10: Montagem do experimento de medição da distância de máximos de intensidade.

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.

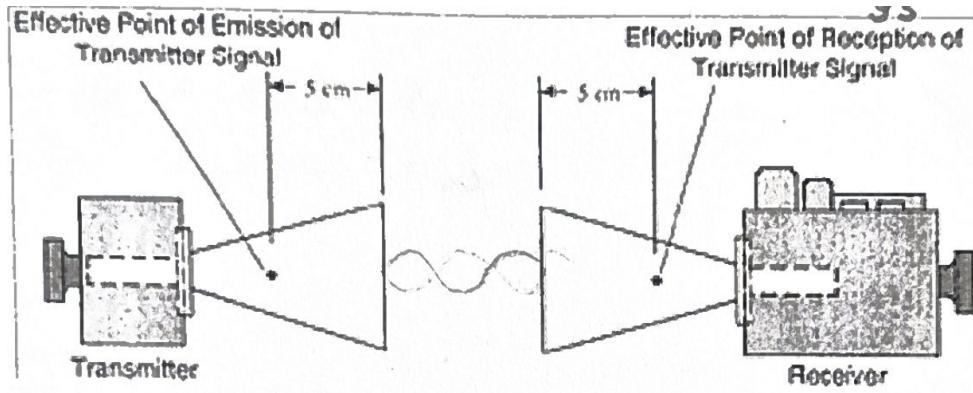


Figura 11: Zona de ressonância.

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.

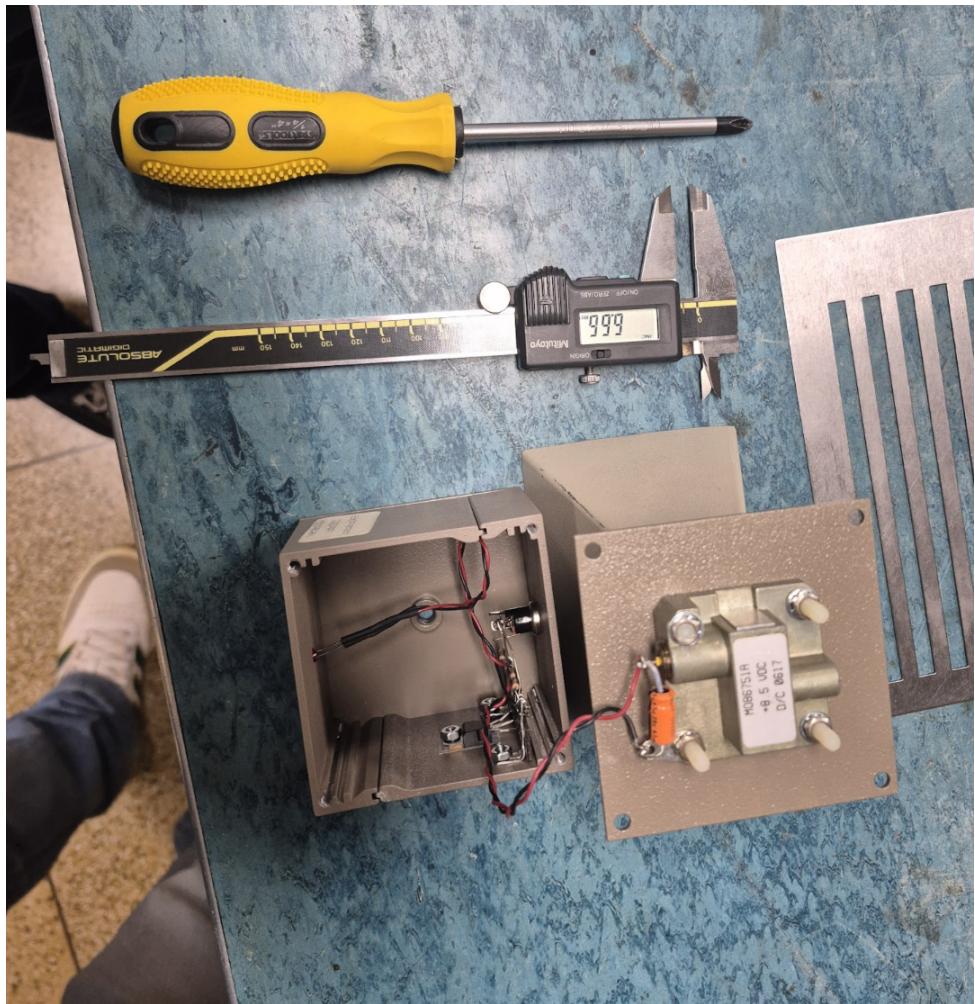


Figura 12: Montagem do experimento de medição da cavidade metálica e modos de propagação.

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

3.1.1.2 Análise dos resultados

3.1.2 Refração

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

3.1.2.1 Apresentação de dados

3.1.2.2 Análise dos resultados

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

3.1.3.2 Análise dos resultados

3.1.4 Polarização

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

3.1.4.1 Apresentação de dados

3.1.4.2 Análise dos resultados

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)	Δdx (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 λ a partir da distância entre os máximos consecutivos, que é dada por Δdx na tabela 2. A média dos valores de Δdx 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 λ :

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

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.

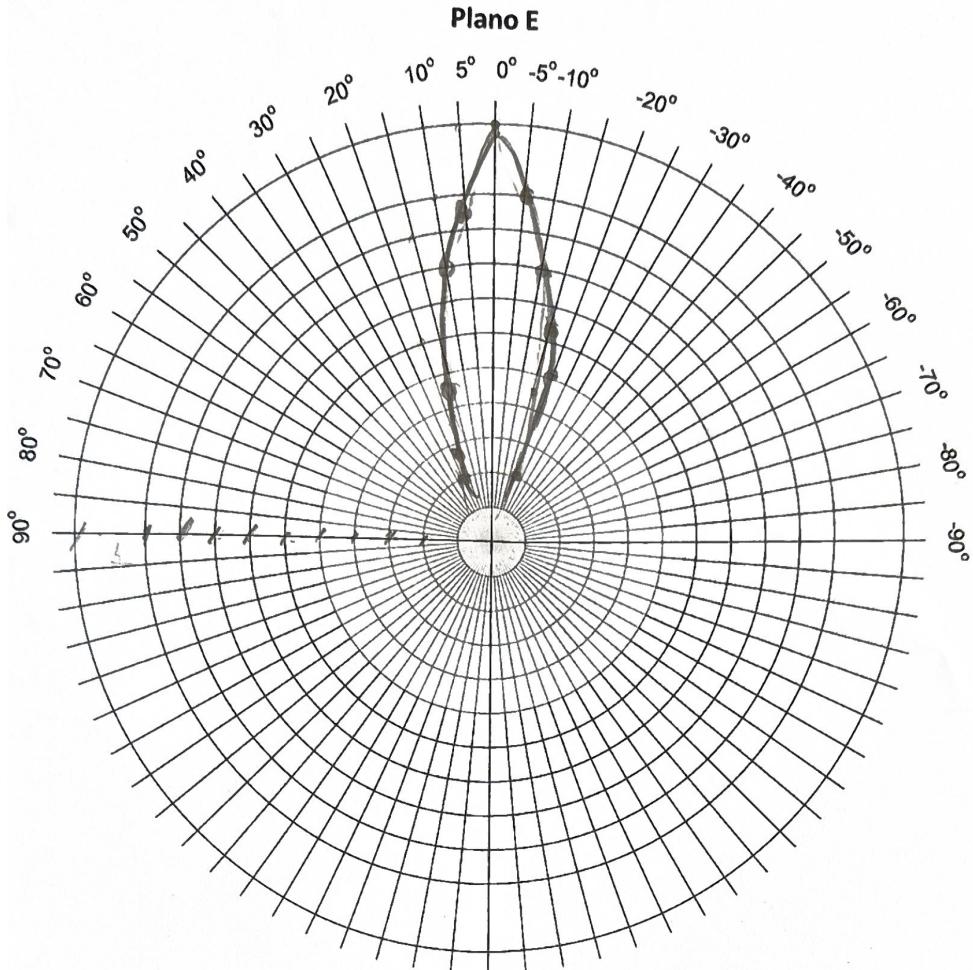


Figura 14: Padrão de radiação da antena no plano E.

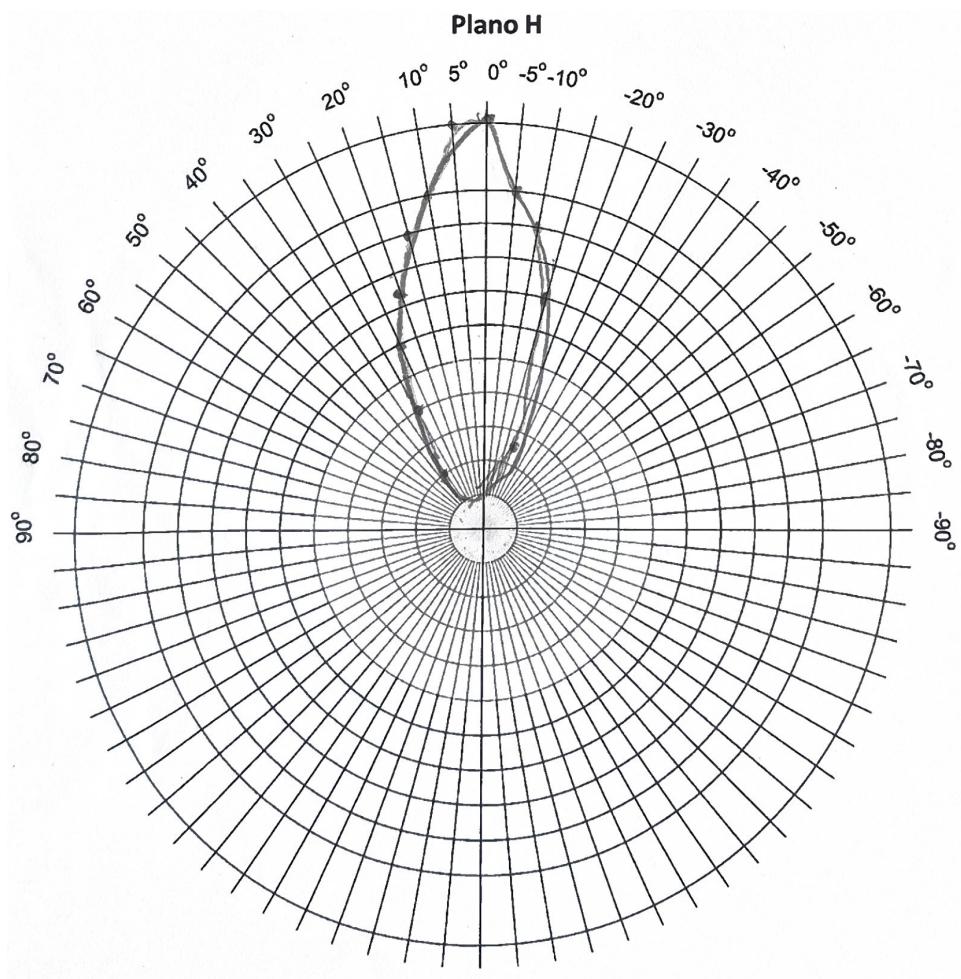


Figura 15: Padrão de radiação da antena no plano H.

4 Conclusão

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. Acesso em: 13 jun. 2025.