

# Microondas

El premio Nobel en física en el año 1978 se otorgó a Arno Allan Penzias y Robert Woodrow Wilson “*por su descubrimiento de la radiación del fondo cósmico de microondas*”.

El premio Nobel en física en el año 2006 se otorgó a John C. Mather y George F. Smoot “*por el descubrimiento de la forma del cuerpo negro y la anisotropía de la radiación de fondo de microondas*”.

## Equipo

- Transmisor de microondas
- Receptor de microondas
- Montaje con goniómetro
- Montaje fijo
- Mesa rotatoria
- Soporte para componentes × 2
- Soporte para componentes rotatorio
- Reflector de metal × 3
- Brazo para rendijas
- Reflector parcial × 2
- Polarizador × 2
- Prisma de espuma de polietileno
- Partículas de estireno
- Bolsa plásticas tubulares



Figura 1: Montaje experimental. Tomada de [2]

## Objetivos

- Evidenciar el carácter ondulatorio de la radiación electromagnética conocida como microondas.
- Estudiar fenómenos de reflexión, difracción, refracción y polarización con microondas.
- Estudiar el interferómetro de Fabry-Perot y la transmisión de microondas a través de *fibra óptica*.

## Conceptos Clave

Microondas, radiación electromagnética, longitud de onda, reflexión, refracción, ondas estacionarias, polarización, interferencia, doble rendija, interferómetro de Fabry-Perot, fibra óptica.

## Bibliografía

- [1] John David Jackson. *Classical electrodynamics*. Wiley, New York, NY, 3rd ed. edition, 1999.
- [2] Pasco. Microwaves optics. <https://www.pasco.com/prodCompare/microwave-optics-systems/index.cfm>.
- [3] D.M. Pozar. *Microwave Engineering*. Wiley, 2012.

## Marco teórico

A partir de las ecuaciones de Maxwell, se obtienen las ecuaciones de ondas que se propagan en el vacío con la velocidad de la luz, estas ondas reciben el nombre de ondas electromagnéticas [1]. De acuerdo a la longitud de onda  $\lambda$  de estas ondas electromagnéticas se puede realizar una clasificación como se observa en la Fig.2<sup>1</sup>. Las ondas electromagnéticas cuyas longitudes de onda se encuentran en el intervalo entre 1mm y 1m se denominan microondas [3].

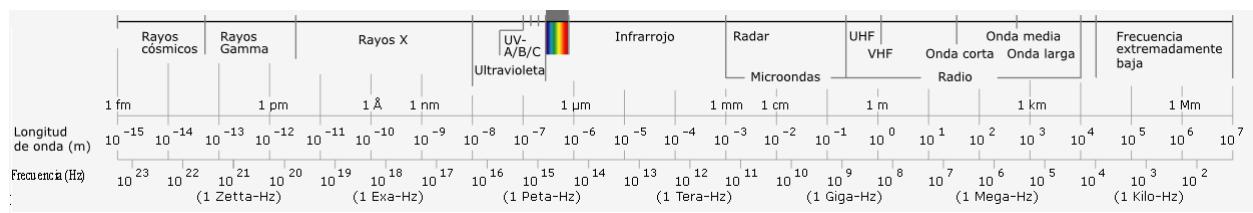


Figura 2: Espectro electromagnético

### Ejercicio 1

1. Investigue acerca de la emisión y detección de microondas, en particular con diodos tipo Gunn y Schottky [2].
2. Investigue cuáles son las principales aplicaciones de las microondas.

## Montaje y Experimento

A continuación se exponen los diferentes montajes con los que se podrán observar fenómenos diferentes de las microondas. Para iniciar, se realizará una breve descripción de los sistemas de emisión y recepción de microondas los cuales serán fundamentales en cada montaje.

## Módulos de emisión y transmisión

El emisor de microondas funciona mediante un diodo Gunn [2] en una cavidad resonadora, la cual resuena a una frecuencia de 10.525 GHz haciendo que las ondas electromagnéticas emitidas tengan una longitud de onda de aproximadamente 2,85cm, es decir, en el rango de microondas. Adicionalmente cuenta con un LED indicando que se encuentra encendido y emitiendo microondas. La radiación emitida estará polarizada a lo largo del eje del diodo, como se muestra en la Fig. 3, y puede ser cambiada rotando el aparato cuando este se encuentre montado en su respectivo soporte.

<sup>1</sup>Imagen tomada de [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electromagnetic\\_spectrum-es.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electromagnetic_spectrum-es.svg)

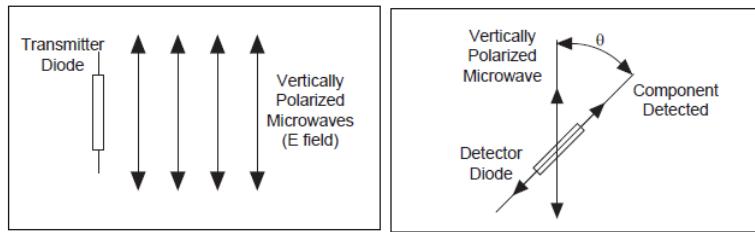


Figura 3: A la izquierda: La polarización de la onda se da en la dirección del eje del diodo. A la derecha: el diodo detector solo detectará radiación con polarización en el mismo eje que este. Tomada de [2]

El receptor de microondas cuenta con un diodo Schottky [2] en una cavidad que resuena a 10.525GHz y este solo responde a la componente de la microonda incidente que está polarizada a lo largo del eje del diodo como se indica en la Fig. 3. La energía de la onda se traduce a un voltaje DC que puede ser amplificado y medido de forma análoga o con ayuda de un multímetro digital. El aparato cuenta con un LED para indicar que cuenta con la batería suficiente para funcionar. Adicionalmente, posee dos perillas con las que se podrá activar el receptor y cambiar el nivel de amplificación de la señal y un ajuste de *offset* llamado *variable sensitivity*.

**Recomendación:** Para las mediciones en cada montaje se recomienda no mover la perilla de amplificación ni la de *offset* una vez haya comenzado a tomar datos. El valor com menor sensibilidad corresponderá a 30X y el de mayor sensibilidad será 1X.



Figura 4: A la izquierda: Emisor de microondas. A la derecha: Receptor de microondas

Cómo se ve en la Fig. 4, tanto el emisor como el receptor cuentan con una estructura para concentrar la radiación emitida en la dirección en la que esta apunta al igual que una bocina. Por ultimo, cabe resaltar que tanto el emisor como el receptor son aparatos no lineales, es decir, que el valor indicado por el aparato de medición (ya sea en mA o en voltios con el multímetro) no será proporcional ni al campo eléctrico ni a la intensidad de la onda electromagnética, tenderá a reflejar un valor intermedio entre estas dos cantidades.

### Actividad 1: Ondas estacionarias

En esta primera actividad, se familiarizará con el sistema de medición y el de emisión. También será posible medir la longitud de onda de la radiación electromagnética que envía

el emisor. Primero, coloque el emisor y el receptor en la base con goniómetro de acuerdo a la Fig 5.

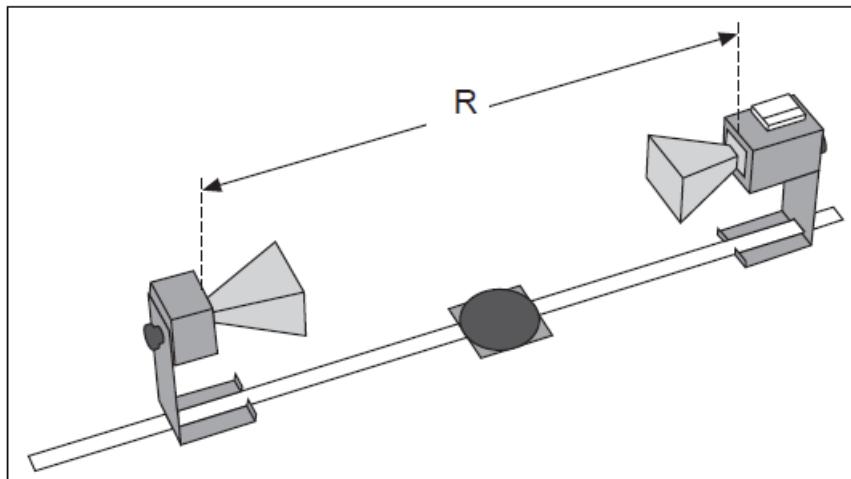


Figura 5: Montaje para medir ondas estacionarias. Tomada de [2]

Asegúrese de orientar la bocina del receptor y emisor en la misma dirección, puede usar el goniómetro ubicado al respaldo de cada aparato para que la alineación sea más precisa. Encienda el emisor y el transmisor y verifique que se obtiene una lectura en el medidor. Ubique en la base de cada aparato, las letras  $T$  y  $R$ , estas indicarán la posición del diodo de transmisión y de recepción respectivamente. Ajuste la distancia  $R$  entre 40cm y 50cm, gire la perilla de offset en sentido antihorario completamente y ajuste el nivel de amplificación tal que se obtenga una medida inferior a 1mA. Ahora mueva la perilla de offset hasta que llegue a 1mA aproximadamente, este será su valor de referencia.

**Recomendación:** para todas las mediciones que realizará en las diferentes actividades, tenga en cuenta que puede haber reflexión de las microondas sobre objetos metálicos, la mesa, paredes y demás objetos que se encuentren cerca al montaje, incluso el cuerpo del experimentador. Para obtener mejores resultados en la medición, reduzca al máximo las superficies reflectoras en el camino de las microondas. Siempre mantenga el receptor y emisor con el mismo eje de polarización durante el desarrollo de las actividades, a menos que la actividad requiera que rote los aparatos.

- Aumente la distancia  $R$  lentamente y describa que sucede con el medidor. Explique lo que sucede en términos de ondas estacionarias, tenga en cuenta que el receptor refleja parte de la onda que a este llega.
- Coloque un reflector metálico y un reflector parcial en diferentes posiciones alrededor del camino entre el emisor y el receptor. Describa cualitativamente lo que observa en la medición.
- Para determinar cómo cambia la lectura del aparato con la distancia entre emisor y receptor aumente la distancia  $R$  y tome mediciones. Para evitar el fenómeno oscilatorio tome mediciones solo en los máximos o mínimos. ¿Cómo se comparan

sus resultados de acuerdo a lo que se espera de la intensidad  $I$  y el campo eléctrico  $E$  de la onda? Recuerde que el medidor es no-lineal y que  $E \propto 1/R$ ,  $I \propto 1/R^2$ .

- A partir de la distancia entre mínimos/máximos determine la longitud de onda de la radiación electromagnética. Compare con el valor reportado por el fabricante de  $\lambda = 2,85\text{cm}$ .

### Actividad 2: Reflexión

Ubique el montaje como se muestra en la Fig. 6, donde el reflector será una placa metálica montada en el soporte para componentes rotatorio<sup>2</sup> y el receptor se ubica en el brazo que puede rotar del montaje con goniómetro.

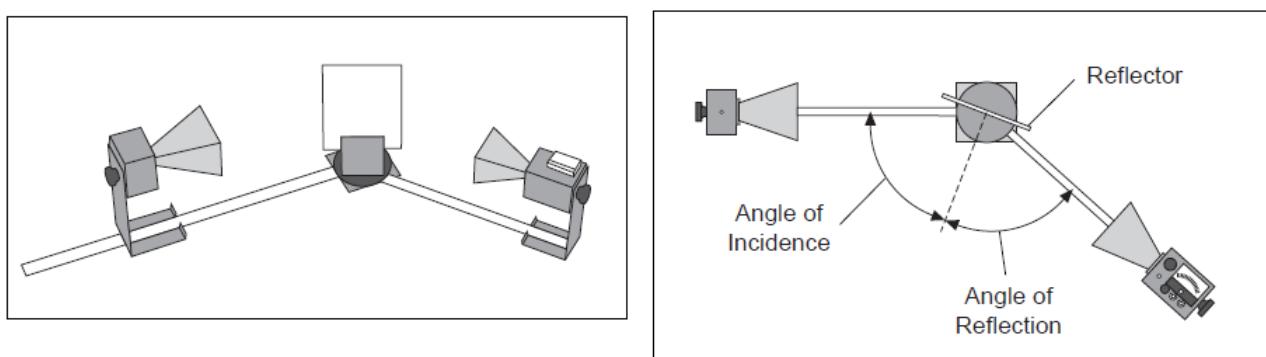


Figura 6: Montaje para experimento de reflexión de ondas. Tomada de [2]

No olvide asegurarse que el emisor y el receptor se encuentran alineados (respecto al ángulo de polarización). Como se puede ver en la Fig. 6 el ángulo de incidencia y el de reflexión se miden de acuerdo a la normal del reflector.

1. Para un ángulo fijo de incidencia de  $45^\circ$ , mueva el brazo donde se encuentra el receptor y con la amplificación adecuada encuentre la posición para la cual se registra un valor máximo en la lectura. Registre este ángulo como el ángulo de reflexión y repita el procedimiento para diferentes ángulos de incidencia.

**Advertencia:** Para ciertos ángulos, el receptor recibirá la señal directa y la reflejada por lo que encontrar el máximo de la lectura del aparato puede resultar dispendioso y el valor obtenido del ángulo de reflexión puede no ser acertado

2. ¿Por qué se obtienen mediciones no nulas para ángulos diferentes al ángulo de reflexión medido? Justifique su respuesta en términos de la forma de la onda (e.g. esférica, plana, cilíndrica).
3. ¿Qué relación existe entre el ángulo de incidencia y reflexión según los datos que se tomaron? ¿Es valida para todos los ángulos?
4. ¿Cómo afecta la reflexión a la intensidad de la onda? ¿La intensidad depende del ángulo de reflexión?

<sup>2</sup>El cual tiene un orificio circular y se puede colocar encima del goniómetro.

5. En este caso se observó que el metal refleja las microondas. Investigue sobre las propiedades reflectivas de otros materiales. ¿Qué tipo de materiales absorben más las microondas? ¿Qué tipo de materiales las reflejan (o dejan pasar) mejor?

### Actividad 3: Polarización

En esta actividad, se realizará un análisis de la polarización de una onda electromagnética y como se puede cambiar por medio de un polarizador. Primero, ajuste el montaje como en la actividad 1 (ver Fig. 5). Con el emisor y receptor alineados y a una distancia de 50cm aproximadamente, use el amplificador y offset para tener una lectura de 1mA aproximadamente.

1. Manteniendo la distancia constante, gire el emisor sobre su eje y observe qué sucede con la lectura del receptor. Registre los valores del ángulo de rotación del receptor (cada 10° aproximadamente) y la lectura en el receptor.
2. De acuerdo a la ley de Malus, la intensidad debe atenuarse de acuerdo a la relación  $I = I_0 \cos^2 \theta$  y de forma equivalente para el campo eléctrico  $|E| = |E_0| \cos \theta$ . Normalice sus mediciones y realice una gráfica en la que se muestre  $|\cos \theta|$ ,  $\cos^2 \theta$  junto a sus datos. ¿Qué puede concluir sobre la lectura del receptor?
3. Con el receptor y emisor alineados, coloque un polarizador como se muestra en la figura Fig. 7 y registre la lectura del receptor para diferentes ángulos del polarizador ( $0^\circ, 22,5^\circ, 45^\circ, 67,5^\circ, 90^\circ$ ). Justifique los resultados obtenidos.
4. Rote el emisor un ángulo de  $90^\circ$  con respecto al receptor tal que sin el polarizador en medio no se observe señal apreciable en el medidor. Ahora inserte el polarizador en medio y registre la medición para tres configuraciones  $0^\circ, 45^\circ$  y  $90^\circ$ . Registre y justifique lo que observa.
5. Usando un segundo polarizador y con el emisor y receptor alineados, cambie el ángulo relativo entre los dos polarizadores. Registre el valor de lectura del receptor y explique sus resultados.

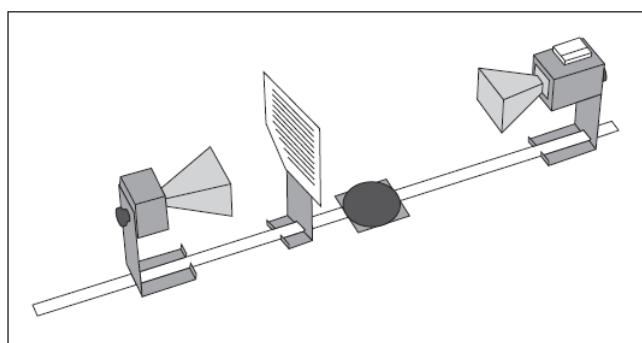


Figura 7: Montaje de polarización. Tomada de [2]

### Actividad 4: Refracción

En esta actividad se demostrará la refracción que sufre una onda electromagnética cuando cambia el índice de refracción del medio donde se propaga. El ángulo de incidencia de la onda y el ángulo de la onda refractada se relacionan mediante la ley de Snell

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

donde  $n_1$  y  $n_2$  son los índices de refracción en el respectivo medio. Como se muestra en la Fig. 8 los ángulos se miden con respecto a la normal de la superficie de frontera.

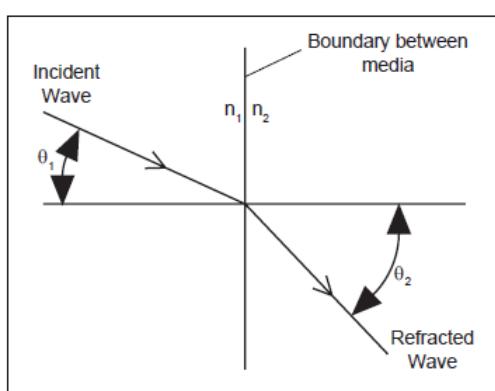


Figura 8: Ángulos de refracción. Tomada de [2]

Para observar este fenómeno realice el montaje con la base rotatoria y el prisma de espuma de polietileno, agregando con cuidado las partículas de estireno hasta el tope. El montaje se muestra en la Fig. 9.

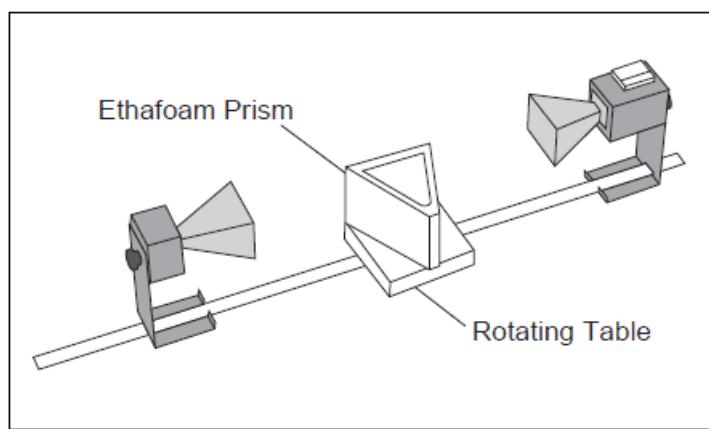


Figura 9: Montaje de refracción. Tomada de [2]

Coloque el prisma tal que la cara donde incidan las microondas sea perpendicular a la propagación de estas. Esto se realiza con el fin de tener un ángulo de incidencia de  $0^\circ$  a la entrada del prisma. Cuando las ondas salen del prisma, el ángulo será distinto a cero y dependerá de la geometría del prisma. Los ángulos de incidencia y de refracción serán los

que se muestran en la Fig. 10. Note que los ángulos se miden con respecto a la normal de la superficie de salida del prisma. Acomodando el prisma como se indicó previamente, el ángulo  $\theta_1 \approx 22^\circ$ .

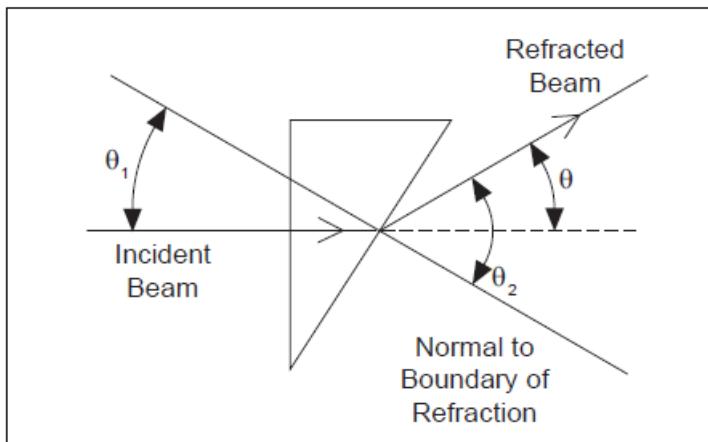


Figura 10: Montaje de refracción. Tomada de [2]

1. Con el receptor en el brazo del montaje con goniómetro y con los ajustes necesarios de amplificación y offset, encuentre el ángulo  $\theta$  (ver Fig. 10) para el cual la lectura es máxima.
2. Con los ángulos  $\theta$  y  $\theta_1$ , calcule el ángulo  $\theta_2$ .
3. Usando la ley de Snell, calcule el índice de refracción de las partículas de estireno con su respectiva incertidumbre. El resultado esperado es de  $n_1 = 1,37 \pm 0,07$ .
4. Teniendo en cuenta la geometría de las ondas (planas, esféricas) ¿Qué tan precisas espera que sean las mediciones de los ángulos?

### Actividad 5: Doble rendija

Debido a la naturaleza ondulatoria, fenómenos de interferencia se presentan en las microondas. Para demostrar este fenómeno, se utiliza el conocido experimento de doble rendija. La intensidad observada tendrá crestas y valles y será descrita por la ecuación de acuerdo a la aproximación de Fresnel)

$$I = I_0 \cos^2 \left( \frac{\pi}{\lambda} d \sin \theta \right) \left( \frac{\sin \left( \frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta \right)}{\frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta} \right)^2, \quad (2)$$

donde  $d$  es la distancia entre el centro de las rendijas y  $a$  es el ancho de cada rendija. En esta expresión, el ángulo  $\theta$  será aquel entre la normal a las rendijas y el aparato de medición, en este caso el receptor de microondas como se observa en la Fig 11.

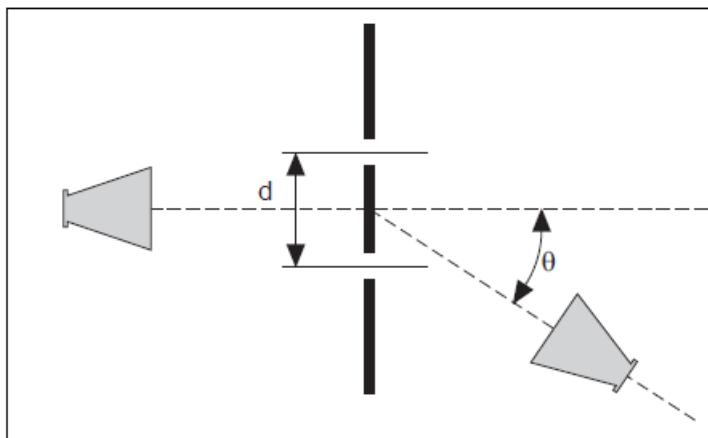


Figura 11: Esquema de doble rendija. Tomada de [2]

Para realizar el montaje correspondiente, ubique los elementos como en la Fig 12. Use el brazo para rendijas (la barra en forma de L), acoplado al soporte para componentes rotatorio y ubique ambos elementos sobre el goniómetro. Utilice los reflectores de metal para armar la doble rendija. Asegúrese de obtener un montaje lo más simétrico posible.

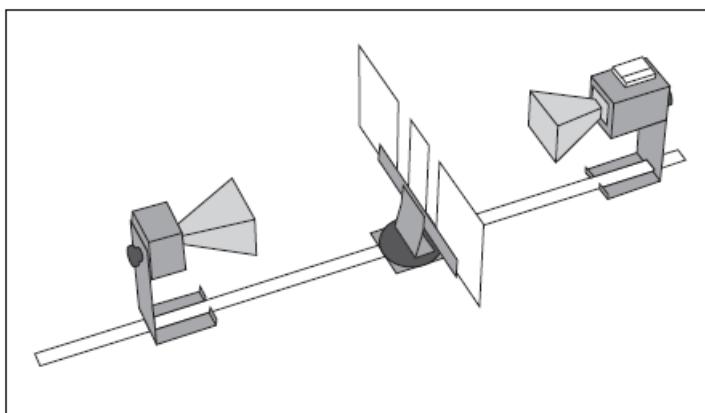


Figura 12: Montaje de doble rendija. Tomada de [2]

- Realice una medición de la distancia  $d$  y asegúrese que la apertura de ambas rendijas  $a$  es aproximadamente la misma.

**Recomendación:** Escoja un valor de  $a \approx 1,5\text{cm}$  y revise periódicamente que esta distancia se mantenga, las placas de metal tienden a moverse sobre el brazo para rendijas.

- Haciendo un barrido del ángulo  $\theta$  ( $0^\circ - 80^\circ$ ), registre la lectura del aparato de medición. Normalice sus valores de acuerdo a la lectura más alta (que debe ocurrir para  $\theta = 0^\circ$ ) y realiza una gráfica comparando sus resultados con la fórmula (2). Los datos obtenidos para una distancia de  $a = 1,8\text{cm}$  y  $d = 6,8\text{cm}$  se puede ver en la Fig. 13.

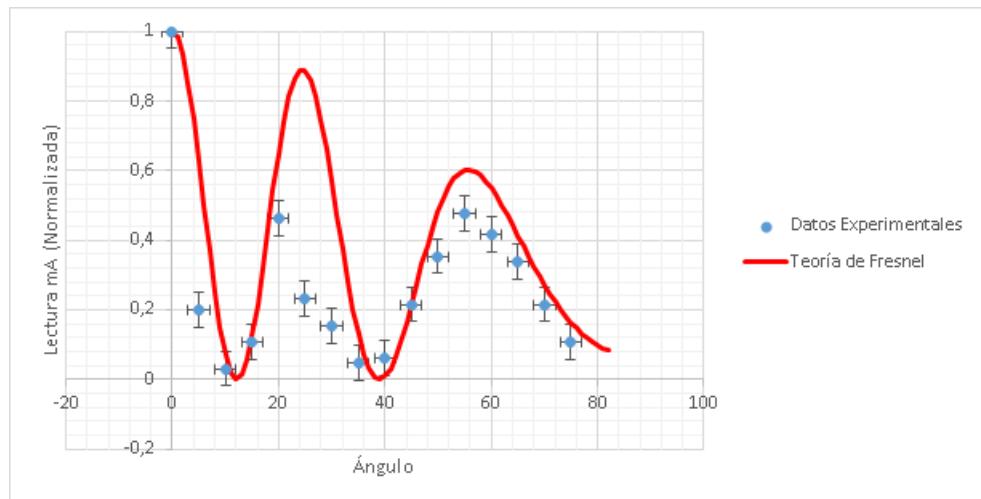


Figura 13: Montaje de doble rendija. Tomada de [2]

3. Realice un barrido más fino para identificar en qué ángulo se encuentran los máximos y mínimos locales. Compárelos con los que se obtienen usando la ecuación (2).
4. Para obtener la ecuación (2) se hace la suposición de que la distancia hasta el receptor es mucho mayor que la distancia entre rendijas. ¿Se cumple esto en el montaje experimental? ¿Cómo podría afectar las mediciones?

### Actividad 6: Interferómetro de Fabry-Perot

Un interferómetro de Fabry-Perot consiste en dos superficies reflectoras (o en este caso parcialmente reflectoras<sup>3</sup>) ubicadas entre una fuente y un detector. La distancia entre las superficies reflectoras determinará si ocurre interferencia destructiva o constructiva., la cual se refleja en menor o mayor intensidad registrada en el detector. Para comenzar, ubique los equipos como se muestra en la Fig. 14.

Recomendación: Para obtener mejores resultados, ajuste el reflector parcial más cercano al emisor a una distancia fija y no lo mueva durante el experimento. Adicionalmente, la distancia entre el emisor y el receptor debe ser de aproximadamente 1m.

<sup>3</sup>Las láminas no metálicas

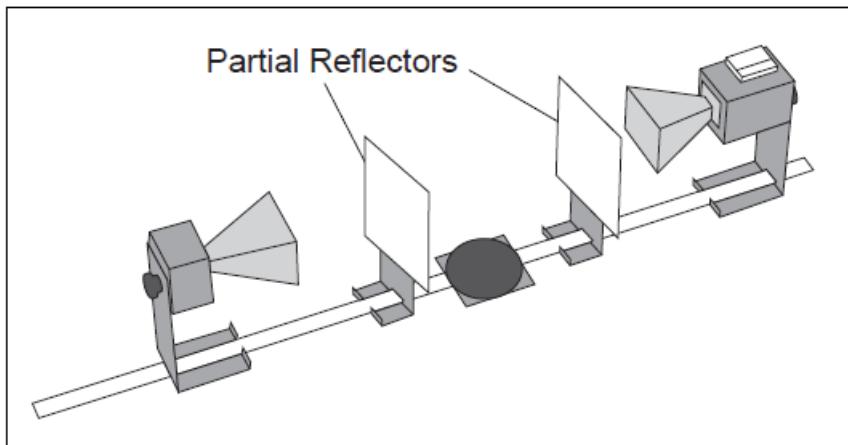


Figura 14: Montaje de Fabry-Perot. Tomada de [2]

1. Mida la distancia entre los reflectores parciales y mueva el reflector parcial más cercano al receptor. Observe y comente lo que observa acerca de la intensidad medida.
2. Comience con los reflectores a la menor distancia posible. Moviendo el reflector más cercano al receptor, aumente lentamente esta distancia y anote la distancia entre 2 mínimos consecutivos. ¿Cómo se puede calcular la longitud de onda a partir de este resultado?
3. Sacando el promedio y la desviación estándar de la distancia entre mínimos consecutivos para diferentes posiciones de los reflectores parciales, calcule la longitud de onda con su respectiva incertidumbre. Compárela con el valor reportado por el fabricante de 2.85cm.

### Actividad 7: Fibra óptica

Las ondas electromagnéticas como la luz de un láser pueden viajar por un tubo flexible de vidrio. El fenómeno responsable de que la onda permanezca confinada al tubo es el de reflexión interna total. En este caso, dado que la longitud de onda de las ondas electromagnéticas es de un orden de magnitud diferente, se debe recurrir a un material diferente al vidrio, en este caso se usarán las partículas de estípido cuyo índice de refracción ya se calculó previamente. Para el montaje, ubique el receptor y el receptor a una distancia de 30cm aproximadamente y llene una de las bolsas plásticas con las partículas.

**Precaución:** Antes de agregar las partículas, asegúrese que la bolsa plástica no tenga orificios. Cuando termine de llenar la bolsa realice un nudo para evitar la fuga de partículas.

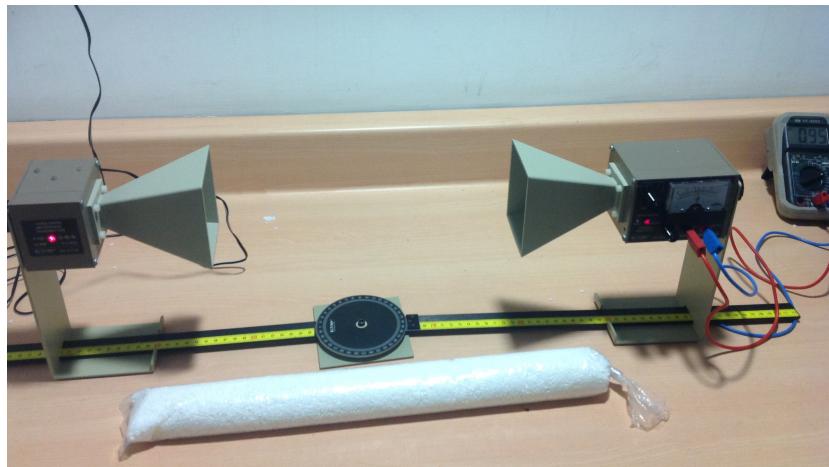


Figura 15: Montaje de Fibra óptica

Ahora, encienda el detector y ajuste la amplificación y el offset tal que tenga una medición de 0.5mA aproximadamente. Sin cambiar la distancia entre emisor y receptor coloque los extremos de la bolsa plástica llena con partículas de estíleno dentro de las bocinas. Intente que la distancia entre emisor y receptor sea tal que la bolsa plástica no presente una curvatura significativa.

1. Describa qué sucede con la amplitud cuando coloca la bolsa con partículas de estíleno. Justifique el comportamiento observado.
2. Rote el brazo móvil del montaje con goniómetro hasta que el detector tenga una lectura aproximadamente de 0mA. Ahora coloque la bolsa con partículas entre las bocinas. En este punto si es admisible cierta curvatura en la bolsa. ¿A qué valor de curvatura máximo se obtiene una lectura significativa?
3. Según el valor para el índice de refracción de las partículas, calcule cuál sería el valor del ángulo crítico para que ocurra reflexión total interna. Relacione el valor, con lo que observó en el punto anterior.
4. ¿Cómo influye el tamaño de las partículas en la transmisión o dispersión de una onda electromagnética?

## Ejercicio 2

1. ¿En qué magnitud cree que afectan las siguientes variables en el experimento? -
  - No linealidad con la intensidad o campo eléctrico del proceso de transmisión y detección
  - Ruido debido a fuentes electromagnéticas externas.
  - Geometría de la onda emitida (plana, esférica, cilíndrica).
  - Material de las superficies cercanas a donde se realiza el montaje experimental.
2. ¿Cómo podría (si es posible) minimizar los efectos de las variables mencionadas en el punto anterior?