

# Laboratorio Intermedio Microondas\*

Juan Sebastián Parada  
*Universidad de Los Andes*

Daniel Forero  
*Universidad de Los Andes*  
(Dated: 26 de octubre de 2017)

Las microondas son ondas electromagnéticas con longitudes de onda entre 1 m y 1 mm, que, gracias a cortas longitudes de onda, tienen aplicaciones en telecomunicaciones, satélites, redes inalámbricas, sistemas de radar, investigaciones científicas, tratamientos clínicos y en hornos microondas. Dada su importancia, se realizó un estudio de los fenómenos de propagación, emisión, recepción, transmisión reflexión, refracción y polarización de microondas. Específicamente, se midieron longitudes de onda de microondas a partir de distancias entre mínimos de intensidad y se contrastaron con longitudes calculadas a partir del interferómetro de Fabry-Perot. En el segundo caso se obtuvo una medida más cercana al valor teórico de  $2,85\text{cm}$ . Adicionalmente, el fenómeno de refracción permitió calcular con gran certeza el índice de refracción del estileno a partir de la ley de Snell. Por su parte, los experimentos de polarización permiten identificar ondas polarizadas generadas por diodos tipo Gunn y la recepción polarizada de ondas en diodos tipo Schottky. Por último, el análisis de una fibra óptica permite relacionar la transmisión de microondas con el fenómeno de reflexión interna, calculando así con una buena aproximación el ángulo crítico a partir del cual se genera la reflexión interna total.

## I. INTRODUCCIÓN

Las microondas son ondas electromagnéticas con frecuencias entre 300 MHz y 300 GHz, es decir, longitudes de onda entre 1 m y 1 mm [1]. El espectro electromagnético de las microondas se ubica entre las ondas de radio, con frecuencias entre 300 MHz y 3 KHz, y las ondas infrarrojas, con frecuencias entre 400 THz y 300 GHz. Estas ondas se propagan a la velocidad de la luz en el vacío, es decir, a una velocidad de  $3 \times 10^8$  m/s.

Existen múltiples aplicaciones de las microondas gracias a sus altas frecuencias y cortas longitudes de onda [1]. Por ejemplo, las microondas se implementan en satélites, redes inalámbricas y sistemas de comunicación terrestres ya que viajan en la línea de visión y no se curvan al interactuar con la ionosfera como las señales con frecuencias más bajas. Así, dispositivos como teléfonos móviles, sensores remotos, satélites de posicionamiento global, redes inalámbricas locales y sistemas de radar emiten y detectan este tipo de ondas electromagnéticas. Además, los objetos emiten energía de microondas que puede ser detectada, generando información que facilita diagnósticos y tratamientos médicos. Inclusive, las microondas son ampliamente usadas en investigaciones científicas gracias a que diversas resonancias moleculares, atómicas y nucleares ocurren en el rango de frecuencias característico de estas ondas. Por último, las microondas permiten calentar sustancias ya que interactúan con las moléculas polares, especialmente con las moléculas de agua, aumentando su energía cinética. Por lo tanto, estas ondas son óptimas para el funcionamiento de hornos microondas.

Estas aplicaciones reflejan la importancia que tienen las microondas en la sociedad actual y, por lo tanto, es fundamental conocer propiedades relacionadas con su propagación, emisión, recepción, transmisión reflexión, refracción y polarización. Sin embargo, antes de estudiar experimentalmente estos fenómenos es necesario conocer algunos conceptos teóricos relevantes.

## II. MARCO TEÓRICO

Para realizar un análisis detallado de las propiedades de las microondas se presentan a continuación algunas definiciones teóricas que facilitan la comprensión de los fenómenos a trabajar experimentalmente.

### A. Radiación electromagnética

La radiación electromagnética es una combinación de campos eléctricos y magnéticos oscilantes que transportan energía durante su propagación a una velocidad de  $3 \times 10^8$  m/s, es decir, a la velocidad de la luz  $c$ . Las ondas electromagnéticas se caracterizan por ser ondas transversales, con campos eléctrico y magnético perpendiculares entre sí y con respecto a la dirección de propagación. El espectro electromagnético es una división de las ondas electromagnéticas según su frecuencia o longitud de onda. De menor a mayor frecuencia, el espectro electromagnético incluye las ondas de radio, las microondas, la radiación infrarroja, la luz visible, la radiación ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma.

Las ondas electromagnéticas portan energía, momento y momento angular y pueden impartir estas propiedades

---

\* Llevado a cabo el 17 y 31 de agosto de 2017

a la materia con la que interactúan. Estas ondas se generan por el movimiento de cargas aceleradas y, mediante los campos eléctrico y magnético pueden interactuar con otras cargas. Las ondas electromagnéticas se representan mediante ondas sinusoidales, con crestas y valles que definen lo que se denomina la longitud de onda

### B. Longitud de onda

La longitud de onda, representada con la letra griega  $\lambda$ , es la distancia entre dos crestas seguidas en una onda periódica, que a su vez es equivalente a la longitud que existe entre dos valles seguidos [2]. La longitud de onda tiene unidades de distancia y se relaciona con la velocidad de propagación  $v$  y la frecuencia  $f$  de una onda mediante la expresión

$$v = \lambda f.$$

### C. Reflexión y refracción

Cuando una onda incide sobre una interfase entre dos materiales distintos, los rayos incidente, reflejado y refractado yacen todos sobre un mismo plano perpendicular a la superficie que divide a los dos materiales. La reflexión ocurre cuando la onda incidente rebota sobre la superficie y transmite energía de vuelta a las partículas del medio de incidencia. Si la superficie sobre la cual se refleja el rayo incidente es muy lisa comparada con la longitud de onda se presenta lo que se denomina reflexión especular. Cuando esto ocurre, el ángulo de reflexión, que es el ángulo entre el rayo reflejado y el eje normal a la superficie, es igual al ángulo de incidencia. Esta relación, junto con el hecho de que el rayo incidente y el rayo reflejado se transmiten en un mismo plano constituyen la ley de reflexión.

Por su parte, el fenómeno de refracción se presenta cuando el rayo incidente se transmite a un segundo medio. Este fenómeno se define como el cambio de dirección que experimenta la onda incidente al realizar una transición entre dos medios distintos y se produce si la onda inicial incide de forma oblicua sobre la superficie que separa a los dos medios con índices de refracción diferentes. Como el índice de refracción es la proporción que existe entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en el material, la refracción se genera por el cambio en la velocidad de propagación de la onda en cada medio. La ecuación que permite describir el comportamiento de las ondas incidente y refractada en términos de los ángulos de incidencia  $\theta_1$  y de refracción  $\theta_2$  se conoce como la ley de Snell, la cual establece la relación

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

donde  $n_1$  y  $n_2$  son los índices de refracción del medio de incidencia y de refracción, respectivamente. Como la luz viaja más lento en un material que en el vacío, el índice de refracción siempre toma un valor menor o igual a 1. Los ángulos de incidencia y de refracción se miden con respecto al eje normal a la superficie, como se puede observar en la figura 1.

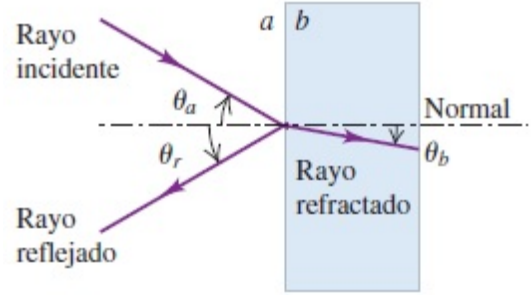


Figura 1. Representación esquemática de los rayos y ángulos de incidencia, reflexión y refracción. [2]

### D. Polarización

La polarización es una propiedad aplicada a ondas transversales, la cual especifica la orientación geométrica de las oscilaciones de la onda. Las ondas transversales son aquellas ondas que oscilan en un plano perpendicular a la dirección de propagación. Por ejemplo, las ondas electromagnéticas son ondas transversales que consisten en la unión entre los campos magnético y eléctrico, que son perpendiculares a la dirección de propagación y entre sí. La polarización de una onda electromagnética coincide con la dirección del campo eléctrico.

En el caso de las microondas, un buen polarizador es un arreglo de alambres conductores estrechamente espaciados y paralelos, que están aislados uno de otro [2]. Los electrones tienen libertad de movimiento a lo largo de los alambres conductores y seguirán esta trayectoria en respuesta a una onda incidente cuyo campo sea paralelo a los alambres. Las corrientes resultantes en los alambres disipan energía por calentamiento, reduciendo así la amplitud de la onda incidente. Las ondas orientadas en forma perpendicular a los alambres pasan prácticamente intactas, ya que los electrones no pasan a través del aire que separa los alambres. Por consiguiente, la que pase a través de un filtro de este tipo queda polarizada en la dirección perpendicular a los alambres.

### E. Interferencia

Interferencia es cualquier situación en la que dos o más ondas se traslapan en el espacio. Esta interacción genera patrones de interferencia, ya que dependiendo de la fase

de las ondas la interferencia puede ser destructiva (las ondas se encuentran desfasadas) o constructiva (las ondas tienen la misma fase). Cuando dos ondas inciden en un mismo punto, la amplitud resultante es equivalente a la suma vectorial de las amplitudes de las ondas individuales. Cuando la diferencia entre las dos fases es un múltiplo impar de  $\pi$  se genera interferencia destructiva y cuando esta diferencia es un múltiplo par de  $\pi$  se presenta interferencia constructiva.

### F. Doble rendija

El experimento de la doble rendija permite demostrar el carácter corpuscular y ondulatorio de la materia [3]. El experimento consiste en la incidencia de una fuente coherente de luz en una placa perforada por dos ranuras paralelas. La luz que pasa las rendijas se observa en una pantalla atrás de las placas. El resultado es una interferencia de las ondas de luz que cruzan ambas rendijas, observándose así bandas brillantes y oscuras en la pantalla.

### G. Interferómetro de Fabry-Perot

El interferómetro de Fabry-Perot es un interferómetro de múltiples haces que implementa ondas electromagnéticas y que tiene múltiples aplicaciones en telecomunicaciones y astronomía. Para su funcionamiento hace uso de reflexiones entre dos espejos estrechamente separados, que reflejan y transmiten la onda inicial múltiples veces. Las ondas transmitidas tras diferentes reflexiones se registran, produciendo un patrón de interferencia. En este tipo de interferómetro se cumple que la diferencia entre las longitudes de los caminos de un haz transmitido y uno reflejado debe ser un múltiplo entero de la longitud de onda  $\lambda$  para obtener interferencia constructiva. A partir de un análisis geométrico se puede encontrar la relación entre la separación  $d$  de los espejos, el número  $m$  de longitudes de onda en la separación  $d$ , el ángulo  $\alpha$  de incidencia del haz inicial con respecto a la normal al espejo y la longitud de onda:

$$m\lambda = \frac{2d}{\cos(\alpha)}.$$

### H. Fibra óptica

La fibra óptica es una fibra que permite la transmisión de ondas entre sus dos extremos y es ampliamente usada en comunicaciones. Está compuesta por un núcleo rodeado por una capa de revestimiento de un menor índice de refracción, confinando así la señal en el núcleo de la fibra. Por lo tanto, la fibra actúa como una guía de onda dieléctrica con forma cilíndrica que transmite ondas mediante el proceso de reflexión total interna. Este proceso

tiene lugar cuando el ángulo de incidencia  $\theta_i$  es mayor que el ángulo crítico  $\theta_c$ . Con base en la ley de Snell, esta relación se puede escribir como

$$\theta_i \geq \sin^{-1} \left( \frac{n_2}{n_1} \right),$$

donde  $n_1$  y  $n_2$  son los índices de refracción del medio de incidencia y de transmisión, respectivamente.

## I. Diodos tipo Gunn y Schottky

**Diodo tipo Gunn:** es una forma de diodo (componente electrónico semiconductor pasivo) ampliamente utilizado en osciladores electrónicos para generar microondas. Consiste en un material semiconductor dopante tipo N con tres regiones= un material levemente dopado entre dos materiales altamente dopados. Esto permite que el diodo Gunn tenga una región de resistencia negativa diferencial en la curva característica de corriente contra voltaje, en la que el incremento de un voltaje aplicado causa una disminución de corriente. Gracias a esto, el diodo se desestabiliza y oscila cuando se polariza con voltaje DC, generando así microondas. Este diodo resuena a 10.525 GHz, haciendo que ondas electromagnéticas emitidas tengan una longitud de onda de 2.85 cm, es decir, ondas del rango de microondas.

**Diodo tipo Schottky:** es un diodo semiconductor formado por la unión entre un semiconductor y un metal. Este diodo es implementado en la detección de microondas ya que proporciona conmutaciones rápidas entre estados de conducción directa e inversa y muy bajas tensiones umbral, es decir, bajas diferencias de potencial para que el diodo funcione como conductor y no como circuito abierto. Adicionalmente, el diodo Schottky resuena a 10.525 GHz y responde a la componente de la onda incidente que está polarizada a lo largo del eje del diodo.

## III. MONTAJE EXPERIMENTAL

Durante la práctica, como se ha mencionado, se observaron los distintos fenómenos ondulatorios asociados a las ondas electromagnéticas, en este caso, las microondas.

Todos los diagramas presentados a continuación siguen la convención presentada en la figura 2.

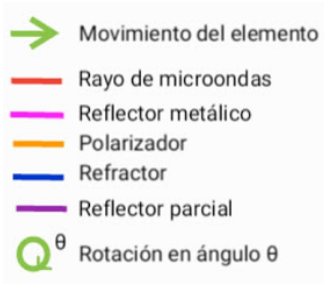


Figura 2. Convenciones para los diagramas que describen los montajes experimentales. la notación  $+ = n$  indica medidas cada aumento de  $n$ .

En primer lugar, se desarrolló un experimento relacionado con la atenuación de las microondas, para lo cual se montó el arreglo experimental que se muestra en la Figura 3).

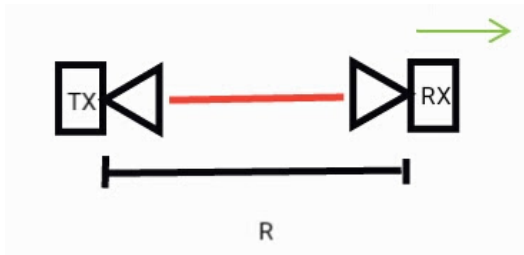


Figura 3. Montaje experimental para ondas planas y atenuación.

En este arreglo, se ubicó el transmisor (TX) y receptor (RX) en línea recta, a una distancia de  $36\text{cm}$  inicialmente. Posteriormente, se alejó el receptor gradualmente, y se tomaron medidas de intensidad cada que se encontraba una intensidad mínima.

Después, para observar el fenómeno de reflexión se implementó el montaje que se puede observar en la figura 4.

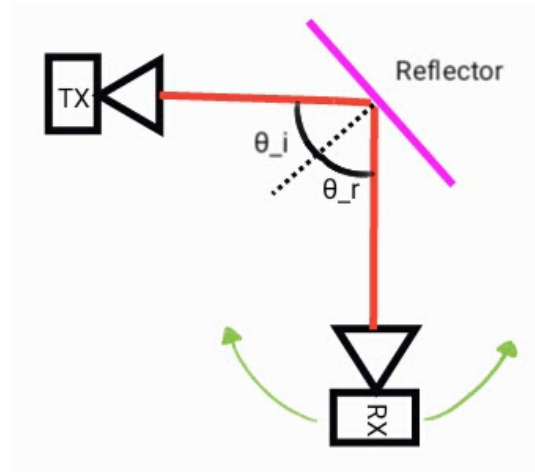


Figura 4. Montaje experimental para el experimento de reflexión.

Siguiendo este montaje, se trasladó el reflector para obtener un ángulo de incidencia  $\theta_i$  definido. Posteriormente, se movió el receptor buscando un máximo en la medición de corriente; se registró para cada  $\theta_i$  el ángulo  $\theta_r$  para el cual se obtuvo dicho máximo.

Después de esto, se hizo el montaje que se muestra en la figura 5, mediante el cual se observó directamente el fenómeno de polarización de las ondas electromagnéticas. Siguiendo el montaje, se registraron medidas de la intensidad en el receptor y se realizaron variaciones al arreglo original, ubicando polarizadores en el medio de el transmisor TX y el receptor RX.

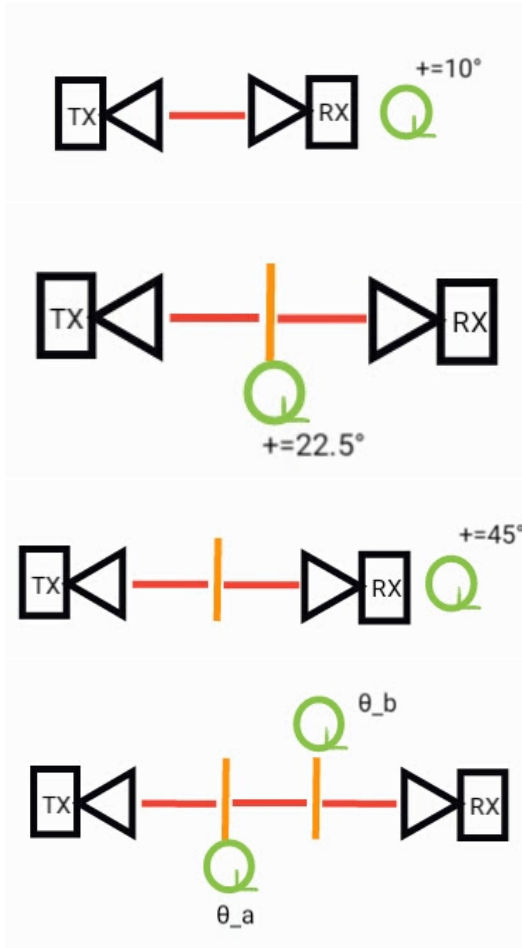


Figura 5. Distintas variaciones del montaje experimental necesarias para los experimentos de polarización.

Para observar la refracción de estas ondas se ensambló el montaje que se puede visualizar en la figura 6.

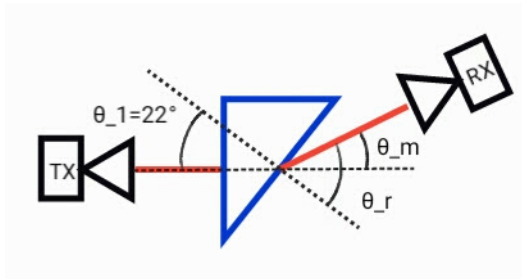


Figura 6. Montaje para el experimento de refracción.

Con dicho montaje experimental, se estableció un ángulo de incidencia ( $\theta_i$ ) nulo, de forma que al mover el receptor y buscar el máximo valor en la medición de la intensidad de corriente, se logró calcular el ángulo de refracción ( $\theta_r$ ) mediante la relación

$$\theta_r = \theta_1 + \theta_m, \quad (1)$$

donde  $\theta_m$  es el ángulo para el cual se encontró el máximo

valor de intensidad de corriente. La ecuación 1 es una relación geométrica deducida a partir de la figura 6.

Otro fenómeno ondulatorio de gran interés es la difracción. Para su observación experimental se construyó el montaje de la figura 7, en el cual se fijó una separación inicial entre TX y RX de  $65\text{cm}$ , una separación entre rendijas de  $8\text{cm}$  y ancho de rendijas de  $2\text{cm}$ . Posteriormente se barrió el ángulo  $\theta$  en el rango de  $[0^\circ, 85^\circ]$  cada  $5^\circ$ .

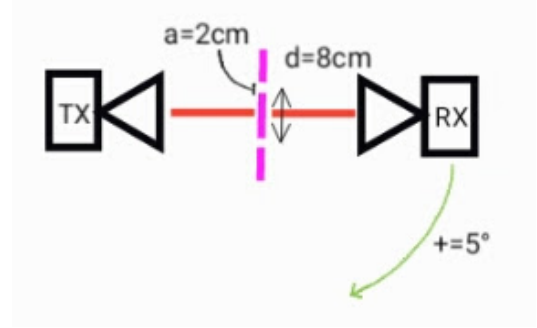


Figura 7. Montaje para el experimento de doble rendija para observar el fenómeno de difracción.

Por otro lado, el interferómetro de Fabry-Perot, mostrado en la figura 8, permitió la medición de la longitud de onda de las microondas utilizadas. Para lograr esto, se fijó una separación inicial de  $69,5\text{cm}$ , se puso un reflector parcial fijo a  $22,5\text{cm}$  del transmisor y un segundo reflector parcial inicialmente a  $42,4\text{cm}$  del transmisor. El segundo reflector parcial se trasladó gradualmente en dirección al receptor, registrando los mínimos de intensidad de corriente hasta llegar al receptor.

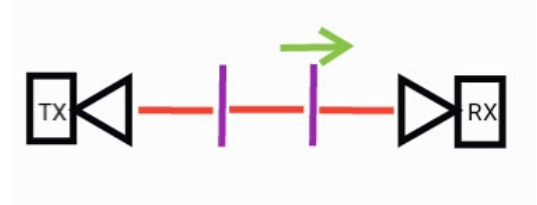


Figura 8. Montaje correspondiente al interferómetro de Fabry-Perot.

Finalmente, una de las aplicaciones más grandes del fenómeno de refracción es la fibra óptica. Para ver su funcionamiento se hizo el montaje presentado en la figura 9, donde la fibra óptica corresponde a una bolsa plástica rellena de partículas de estileno. La separación inicial entre transmisor y receptor es de  $54,5\text{cm}$ .

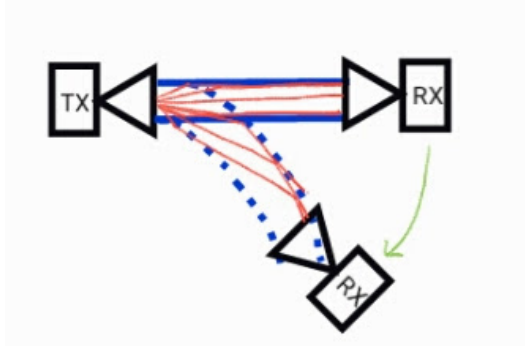


Figura 9. Montaje experimental para observar el funcionamiento de la fibra óptica.

#### IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En primer lugar, se desarrolló el experimento de ondas planas y atenuación, para el cual se obtuvieron los resultados que se muestran en la tabla I.

(Separación $\pm 0,05$ )cm	( $I \pm 0,05$ )mA
36	1
37.5	0.96
39.1	0.92
40.5	0.88
42	0.86
43.6	0.83
45	0.79
46.5	0.76
47.7	0.74
49.4	0.71

Cuadro I. Mediciones obtenidas para el experimento inicial con ondas planas.

Estos datos se muestran en forma de gráfico en la figura 10.

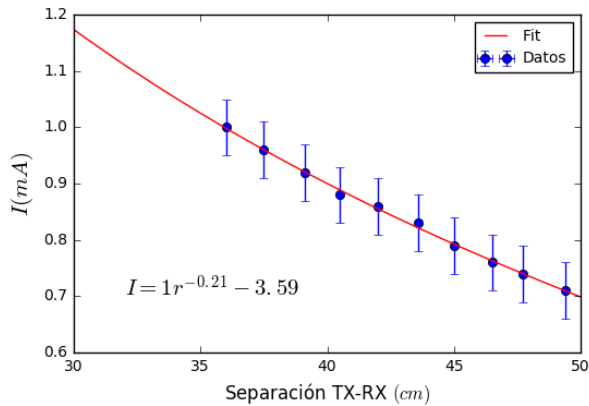


Figura 10. Gráfico obtenido con los datos del experimento de ondas planas y atenuación.

Para analizar los datos obtenidos se realizó un ajuste a una curva de la forma

$$I = a \frac{1}{r^n} + b, \quad (2)$$

donde  $a = 1$ ,  $n = 0,21$  y  $b = -3,59$ . A la luz de estos resultados, se ve que la atenuación de la señal recibida no responde ni al caso típico de intensidad de una onda electromagnética, para el cual se esperaría una disminución en la intensidad con el aumento en  $r$ , es decir, un valor de  $n = 2$ , ni corresponde al caso del campo eléctrico, caso en el que se esperaría  $n = 1$ . Esto es debido a la no linealidad de los diodos que producen y detectan (miden) la onda. Sin embargo, es posible que sea necesaria una distancia mayor entre transmisor y receptor o una mayor sensibilidad en este último para obtener una tendencia más clara en la curva.

Con los datos anteriores se calculó la longitud de onda de las microondas utilizadas, para esto se tomó la relación

$$\lambda = 2d_{min-min} = 2,98cm \pm 0,27cm, \quad (3)$$

donde  $d_{min-min}$  corresponde a la distancia entre mínimos de intensidad. El factor de 2 aparece debido a que al medir la intensidad de la onda ( $I \geq 0$ ) los mínimos no ocurren cada  $\lambda$  sino cada  $\lambda/2$ . El valor obtenido para la longitud de onda presenta un error porcentual de 4% respecto al valor esperado de  $\lambda^e = 2,85cm$ . Este valor de error porcentual indica que el valor obtenido es muy cercano al valor teórico y las causas de este error estarían relacionadas con mediciones erróneas principalmente. Además, el valor de longitud de onda teórico se encuentra en el rango delimitado por la incertidumbre obtenida, lo cual indica que la medición experimental es muy cercana al valor teórico.

A continuación, se analizó el fenómeno de reflexión de las microondas. Las mediciones del ángulo de reflexión  $\theta_r$  realizadas están reportadas en el cuadro II.

$(\theta_i \pm 0,5)^\circ$	$(\theta_r \pm 0,5)^\circ$	( $I \pm 0,05$ )mA
45	45	0.4
30	29	0.4
70	68	0.38
40	38	0.3
60	61	0.4

Cuadro II. Mediciones obtenidas en el experimento de reflexión.

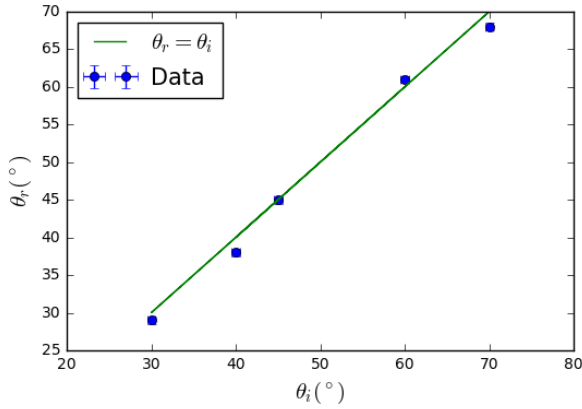


Figura 11. Gráfico obtenido para las mediciones del experimento de reflexión.

A partir de la gráfica presentada en la figura 11 se concluye que los datos se acercan bastante a lo establecido por la ley de reflexión especular, es decir, se cumple que  $\theta_r = \theta_i$ . Para cuantificar esto se obtuvo el coeficiente de correlación, obteniendo un  $r^2 = 0,997$ . La pequeña desviación se debe a errores experimentales, y a la geometría esférica de la onda, ya que si se piensa en la teoría de rayos, se puede entender que un frente de onda esférico es equivalente a infinitos haces perpendiculares a éste. En este orden de ideas, un único haz incidirá con  $\theta_i$ , mientras los otros tendrán pequeñas variaciones. Esto hace que la medida para ángulos  $\theta \neq \theta_r$  sea no nula y, por ende, pueda causar errores experimentales.

El siguiente experimento se realizó con el fin de observar el fenómeno de polarización. Para el primer arreglo de la figura 5 se registraron los datos de intensidad que se muestran en el cuadro III.

$(\theta \pm 0,5)^\circ$	$(I \pm 0,05)mA$
0	1
10	0.99
20	0.91
30	0.77
40	0.58
50	0.35
60	0.14
70	0.02
80	0
90	0

Cuadro III. Datos obtenidos para el experimento de Ley de Malus.

En la figura 12 se observa la comparación entre el gráfico obtenido a partir de los datos y las funciones  $\cos^2 \theta$  y  $|\cos \theta|$ , de forma que se observa como se ajustan a éstas.

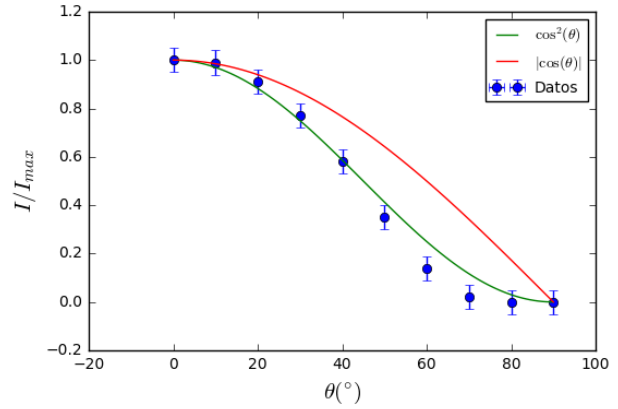


Figura 12. Gráfico obtenido para las mediciones del experimento de Ley de Malus.

Para realizar un análisis más detallado, se obtuvieron los coeficientes de correlación entre los datos y las dos curvas presentadas. Para el caso de  $\cos^2 \theta$  se obtuvo  $r^2 = 0,996$ , mientras que para  $|\cos \theta|$  se obtuvo  $r^2 = 0,948$ . Evidentemente, los datos se ajustan mucho mejor a la primera curva, que corresponde a la Ley de Malus, que describe la intensidad. Por lo tanto, se puede afirmar que la cantidad detectada por el diodo tipo Schottky del receptor está más cercana a la intensidad que al campo eléctrico.

Posteriormente, se modificó el arreglo experimental para obtener el segundo montaje presentado en la figura 5, y se obtuvieron los resultados reportados en el cuadro IV.

$(\theta \pm 0,5)^\circ$	$(I \pm 0,05)mA$
0	0.79
22.5	0.67
45	0.32
67.5	0.2
90	0

Cuadro IV. Datos para el experimento realizado con el segundo montaje de la figura 5.

Los resultados obtenidos se deben a que la componente del campo perpendicular al polarizador es capaz de atravesarlo, de manera que si transmisor y receptor están ambos verticalmente polarizados y se coloca un polarizador horizontal, la onda logrará atravesarlo y, a medida que se gira el polarizador, una porción más pequeña del campo eléctrico llega al receptor.

Posteriormente, se implementó el tercer montaje experimental presentado en la figura 5, comenzando con TX y RX perpendiculares entre sí. En el cuadro V se presentan los resultados obtenidos.



$(\theta \pm 0,5)^\circ$	$(I \pm 0,05)mA$
0	0
45	0.42
90	0

Cuadro V. Resultado obtenidos para el experimento realizado con el tercer montaje de la figura 5.

Los resultados anteriormente reportados (cuadro V sugieren que cuando el polarizador está a  $0^\circ$ , ninguna onda es detectada, ya que si el transmisor está alineado con el polarizador, el campo eléctrico no lo atraviesa (debido a que es la componente perpendicular al polarizador la que lo haría). Cuando se coloca el polarizador a  $45^\circ$ , el polarizador permite el paso de una fracción de la onda (parte perpendicular a éste), de manera que en este caso si se detecta la onda en el receptor. Finalmente, cuando el polarizador se coloca a  $90^\circ$ , toda la onda emitida es capaz de atravesarlo, pero debido a que el detector está perpendicular al emisor, no se detectará la onda.

Con el último montaje de la figura 5 se obtuvieron los datos mostrados en el cuadro VI.

$(\theta \pm 0,5)^\circ$	$(I \pm 0,05)mA$
0	0.16
45	0.14
90	0

Cuadro VI. Datos para el experimento realizado con el último montaje mostrado en la figura 5.

En este caso TX y RX están alineados, de forma que sin polarizadores se obtiene una medición no nula. Cuando ambos polarizadores están a  $0^\circ$  se obtiene también una medición distinta de cero, ya que, como transmisor y receptor están polarizados verticalmente, la onda puede atravesar los polarizadores. Algo similar sucede con los polarizadores a  $45^\circ$  entre sí, ya que una parte de la onda puede atravesarlos. Por otro lado, si los polarizadores están perpendiculares entre sí, la medición es nula, debido a que toda la onda que atraviesa el primer polarizador se encuentra polarizada en la misma dirección que las rejillas del segundo polarizador. Por lo tanto, los electrones pueden transmitirse libremente a partir las rejillas de este segundo polarizador, disminuyendo así totalmente la intensidad registrada en el receptor.

A continuación se realizó el experimento de refracción, para el cual se manejó el montaje de la figura 6. Para este caso se realizó una medición para el ángulo  $\theta_m = 8^\circ$ . Con éste y la información proporcionada en la guía acerca de  $\theta_1 = 22^\circ$ , se calculó el ángulo de refracción  $\theta_r = 30^\circ \pm 0,5^\circ$  y el índice de refracción para las partículas de estileno  $n_1 = 1,33 \pm 1,15$  que está dentro del valor esperado de  $n_1^e = 1,37 \pm 0,07$ . El error en esta medición se estimó con la fórmula usual de propagación

del error y se atribuye a la dispersión geométrica de las ondas, ya que este fenómeno impide una lectura precisa del ángulo de refracción.

Para el experimento de difracción a través de una doble rendija, se tomó el montaje de la figura 7. Los datos registrados de intensidad y ángulo de difracción se pueden visualizar en el cuadro VII.

$(\theta \pm 0,5)^\circ$	$(I \pm 0,05)mA$
0	0.7
5	0.18
10	0.0
15	0.09
20	0.55
25	0.18
30	0.0
35	0.0
40	0.08
45	0.12
50	0.06
55	0.0
60	0.0
65	0.0
70	0.0
75	0.0
80	0.0

Cuadro VII. Datos para el experimento de difracción a través de doble rendija.

Podemos comparar los datos obtenidos con la predicción dada por la ecuación de Fresnel. Esto se ilustra en la figura 13.

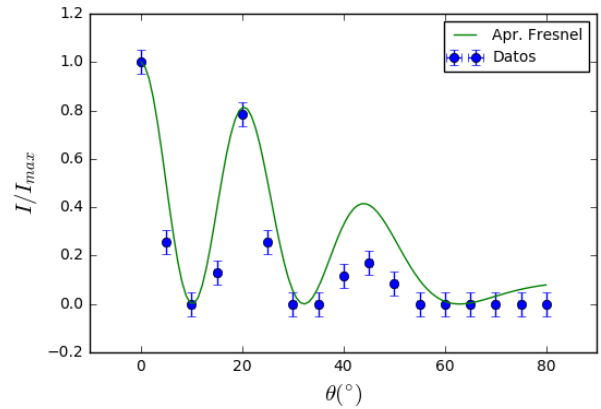


Figura 13. Gráfico obtenido para las mediciones del experimento de doble rendija. Se compara con la predicción dada por la ecuación de Fresnel para este tipo de difracción.

Como se puede ver en la figura 13, la ubicación de los extremos de la función se encuentra acorde con la predicción, pero la medición cae mucho más rápidamente, como se ve en la tercera oscilación. Esto puede ser debido a que Fresnel asume que la distancia de las rendijas



al emisor es mucho mayor al ancho de estas, situación que no es acorde a las condiciones experimentales, ya que la primera era del orden de los  $10^1 cm$  y el ancho  $a = 2cm$ . La correlación entre las medidas y los valores esperados está dada por  $r^2 = 0,94$ , lo que indica una buena correlación.

Posteriormente, se montó el Interferómetro de Fabry-Perot de la figura 8 y se registró la distancia entre los reflectores parciales para la cual se obtenía una medición mínima de intensidad en el receptor. De esta forma, se obtienen los datos que aparecen en el cuadro VIII.

$(d_{min-min} \pm 0,05)cm$	
	1.6
	1.2
	1.6
	1.4
	1.3
	1.6
	1.4
	1.5
	1.5
	1.4
Promedio	1.45

Cuadro VIII. Datos para el experimento del Interferómetro de Fabry-Perot.

Con el promedio reportado en el cuadro VIII se calculó la longitud de onda de la onda utilizada. Para esto se tuvo en cuenta la relación

$$\lambda = 2d_{min-min}, \quad (4)$$

y se obtuvo un valor de  $\lambda = 2,9 \pm 0,26cm$ , el cual se encuentra acorde con el valor esperado  $\lambda^e = 2,85$ . Más aún, este valor es más aproximado que el valor obtenido con el primer montaje experimental implementado (atenuación en función de la distancia entre mínimos de intensidad). El error porcentual obtenido es de 1.75 %, que se debe a mediciones incorrectas durante el experimento

Finalmente, se toma el arreglo mostrado en la figura 9 para el experimento de fibra óptica. En este caso se giró el receptor hasta que la lectura de intensidad dejara de ser significativa. De esta forma se sabría que la fibra óptica habría dejado de funcionar debido a que se sobrepasa el ángulo de reflexión interna total. En nuestro caso, encontramos que la fibra óptica dejaba de funcionar para un ángulo de  $56^\circ$ . Se calculó el ángulo de reflexión interna total teniendo en cuenta el índice de refracción calculado en el experimento en el que se observaba dicho fenómeno. Se obtuvo un valor de  $\theta_c = 48,5^\circ$ . Esto es de esperar ya que el ángulo medido es, por lo menos, mayor al esperado. Es probable que las mediciones que se detectaron entre el ángulo esperado y el medido fueran producto de refracción dentro de la fibra óptica, ya que,

dado que es una curva continua, las microondas pueden incidir con distintos ángulos y “alargar” el fallo de la fibra en general, que solo se observó hasta el ángulo medido.

Adicionalmente, las intensidades obtenidas durante el experimento de fibra óptica fueron mayores con respecto a las intensidades medidas sin la fibra. La explicación de este fenómeno es que la fibra permite reducir la divergencia esférica de la onda, que a su vez genera una disminución en la lectura de intensidad del receptor.

## V. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos se puede concluir lo siguiente:

- La longitud de onda de las microondas de  $2,98cm \pm 0,27cm$  encontrada experimentalmente a partir de las mediciones de las distancias entre mínimos de intensidad es muy cercana al valor teórico proporcionado por el fabricante de  $2,85cm$ . Adicionalmente, el valor de longitud de onda teórico se encuentra dentro de la incertidumbre calculada a partir de los datos experimentales. El error porcentual obtenido con respecto al valor teórico es del 4 % y sus causas estarían asociadas principalmente con mediciones incorrectas de los mínimos de intensidad.
- La reflexión de microondas sobre un reflector metálico sigue la ley de reflexión especular, ya que la máxima medida de intensidad obtenida con el receptor se obtiene para ángulos similares al ángulo de incidencia. El coeficiente de correlación obtenido de 0,997 confirma esta conclusión. La causa de la desviación se atribuye a errores experimentales y al registro de intensidades para ángulos distintos al de incidencia. Esto se debe a la propagación esférica de las microondas, ya que los frentes de onda actúan como infinitos haces que inciden con distintos ángulos sobre el reflector y, por lo tanto, se reflejan a distintos ángulos, generando así lecturas no nulas.
- Los datos obtenidos a partir de los montajes de polarización indican que la gráfica de intensidad en función del ángulo entre el transmisor y el receptor se aproxima a la Ley de Malus, con un coeficiente de correlación de  $r^2 = 0,996$ . Adicionalmente, los polarizadores permiten disminuir la intensidad y cambiar la dirección del campo eléctrico de las microondas. Los electrones interactúan con las rejillas paralelas al campo eléctrico de las microondas, reduciendo así la intensidad de la onda en la dirección de las rejillas del polarizador. Más aún, al ubicar el transmisor y el receptor perpendiculares entre sí se puede evidenciar la polarización inicial de las microondas generadas por el diodo tipo Gunn, ya que la lectura en el transmisor es nula.

- La refracción de ondas permite calcular el índice de refracción del estileno a partir de la medición del ángulo de refracción. El valor obtenido para el índice de refracción del estileno fue  $n_1 = 1,33 \pm 1,15$  que está dentro del valor esperado de  $n_1^e = 1,37 \pm 0,07$ . Los errores en la medición se asocian principalmente con mediciones incorrectas del ángulo de refracción por la dispersión geométrica de las ondas.
- En el experimento de doble rendija se obtiene una gráfica de intensidad con un patrón similar a la gráfica obtenida con la aproximación de Fresnel para este montaje experimental. El coeficiente de correlación entre ambas gráficas es de  $r^2 = 0,94$ , lo que indica una buena correlación. Sin embargo, la intensidad disminuye rápidamente con respecto a la intensidad teórica propuesta por Fresnel. La explicación para esta diferencia es la aproximación de Fresnel según la cual la distancia entre cada rendija es muy corta comparada con la distancia entre las rendijas y el receptor. En el montaje experimen-

tal implementado estas condiciones no se cumplían, razón por la cual las gráficas obtenidas experimentalmente difieren de las gráficas propuestas por la aproximación de Fresnel.

- El interferómetro de Fabry Perot permitió encontrar la longitud de onda de las microondas mediante la medición de las distancias entre los espejos ubicados entre el transmisor y el receptor. El valor de longitud de onda obtenido fue de  $\lambda = 2,9 \pm 0,26 \text{ cm}$ , que es un valor más aproximado al valor teórico reportado por el fabricante que el valor obtenido con el primer montaje experimental.
- La fibra óptica permite reducir la divergencia esférica de las microondas, razón por la cual se obtienen mediciones mayores de intensidad en el receptor. Más aún, la fibra óptica permite que las microondas se transmitan a través de ella siempre y cuando las ondas incidentes incidan a un ángulo mayor que el ángulo de refracción crítico, generando así el fenómeno de reflexión interna total.

---

[1] David M Pozar. *Microwave engineering*. John Wiley & Sons, 2009.

[2] Francis Weston Sears, A Lewis Ford, and Roger A Freed-

man. *Física universitaria: con física moderna*, volume 2. Pearson educación, 2005.

[3] Raymond A Serway, Clement J Moses, and Curt A Moyer. *Modern physics*. Cengage Learning, 2004.